

ЗНАНИЕ

НАРОДНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ • 1979
естественнонаучный факультет

В.С. Фролов

Волшебное зеркало



В.С. Фролов ■ Волшебное зеркало

**НАРОДНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

**естественнонаучный
факультет**

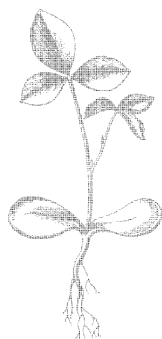
В.С. Фролов

**кандидат
технических
наук**

Волшебное зеркало

**современные
методы
и средства
голографии**

**Издательство
„Знание“
Москва 1979**



Scan AAW

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Глава 1. Голография начиналась так... . . .	9
Глава 2. Глаз как оптический прибор . . .	21
Глава 3. Голография и память	36
Глава 4. От скальпеля к световому перу . .	54
Глава 5. На голограмме аэрозоли и вирусы .	73
Глава 6. Видимый звук	89
Глава 7. Голографический кардиограф . .	103
Глава 8. Голография в системе человек — машина	113
Глава 9. В лабораториях дизайнера, антропо- лога и патологоанатома	120
Глава 10. Перспективы голографии живого .	132

Фролов В. С.

**Ф91 Волшебное зеркало (Современные методы
и средства голографии), М., «Знание», 1979.**

144 с. (Нар. ун-т. Естественнонаучный фак. Из-
дается с 1961 г.)

Книга знакомит читателей с современными успехами мо-
лодой, но успешно развивающейся области знания — голо-
графии.

Автор в популярной форме рассказывает о применении
методов голографии в некоторых областях биологии и ме-
дицины. Книга адресована слушателям народных универси-
тетов естественнонаучных знаний, а также широкому кругу
читателей.

Ф 20404—081
073(02)—79 52—79. 1704050000 22.343.4

Введение

Какие только эпитеты не присваивали нашему XX веку: он и «век электричества», и «атомный», и «век большой химии», и «ракетно-космический». Можно было бы привести и другие, не менее звучные. Но звонкие эпитеты, образно говоря, это лишь грани «магического кристалла» — знаменательнейшего события нашего времени — научно-технической революции.

Владимир Ильич Ленин говорил, что любая революция означает такое преобразование, которое «ломает старое в самом основном и коренном, а не переделывает его осторожно, медленно, постепенно». Свыше шестидесяти лет назад трудящиеся России свергли власть капиталистов и помещиков, сломали старую государственную машину и построили новое, социалистическое общество, основанное на идеалах всеобщего равенства и справедливости, где человек человеку друг, товарищ и брат. Произошла революция в области социальной.

Происходят революции и в науке и в технике. Одна из них свершилась в XVIII в., когда человек изобрел паровую машину. Эта революция получила название

промышленной. Промышленная революция позволила заменить скромную мускульную энергию человека энергией пара. По морям и океанам поплыли пароходы. Сквозь леса и пустыни, равнины и горы человек проложил узкие стальные балки-рельсы. По ним застучали составы с углем и нефтью, хлопком и лесом, помчались пассажирские поезда. Многое дала человечеству промышленная революция. Однако по своей значимости она не идет ни в какое сравнение с развернувшейся в 50-х годах нашего века научно-технической революцией, или сокращенно НТР.

Человек проник в тайны атомного ядра, разгадал код наследственности, прорубил окно в безбрежное космическое пространство, создал технические устройства, основанные на невиданных доселе эффектах. НТР позволила человеку в миллиарды раз усилить мощь своих мышц, вручила ключ к познанию и усилению человеческого интеллекта. Человек стал видеть ранее невидимое, слышать неслышимое, ощущать неосознаваемое, с фантастической скоростью решать сложнейшие математические задачи.

Представим научно-технический прогресс человечества как бег спортсменов на большую дистанцию. Длина этой марафонской дистанции пусть будет 60 км, а каждый километр соответствует периоду развития человечества в 10 000 лет. Почему мы взяли цифру 60? Примерно 600 000 ($60 \times 10\,000$) лет назад, по мнению некоторых ученых (по этому поводу до сих пор идут жаркие споры), начинался «Гомо сапиенс», или «Человек разумный». Проследим его путь по нашей дистанции научно-технического прогресса вплоть до наших дней. Этот символический бег будет выглядеть следующим образом.

На большей части пути — девственные леса. Позади 10... 20... 30 км. Картина почти не меняется. Вот пройдено уже 40... 50 км. Картина прежняя, 55... 58... 59 км. Появляются первые признаки культуры: орудия первобытного человека, пещерные рисунки. Заканчивается 59-й километр. Впереди последний километр пути! Появляются первые земледельцы. 900... 500... 300 м до финиша — дорога из каменных плит ведет бегунов мимо египетских пирамид и древнеримских укреплений. 100 м до финиша — появляются средневековые городские строения, слышны крики сжигае-

мых на кострах жертв инквизиции... До конца дистанции остается 50 м. Здесь за бегом спортсменов внимательно следит человек «с умными и все понимающими глазами» — Леонардо да Винчи. Минуту его, бегуны следуют дальше. Всего 10 м до финиша. Марафонцы бегут при свете факелов и тусклом мерцании масляных ламп. Еще несколько метров пути, и свершилось чудо: электрический свет залил ночную дорогу, мелькают паровые повозки, загудели автомобили, с неба ринулась вниз звуковая волна от первого самолета, на горизонте выросло грибовидное облако ядерного взрыва, огромная, как колокольня, ракета, извергая пламя, устремилась в космос. Бегунов ослепили вспышки юпитеров, окружили корреспонденты, репортеры радио и телевидения...

Вы уже, наверное, заметили, что последние метры этой символической дистанции, где происходило столько событий, составляют меньше 100 лет мировой истории. Именно за этот исчезающе малый (с исторической точки зрения) промежуток времени появились радио и радар, телевизор и атомная электростанция, лазер и мазер, сверхзвуковой самолет и космическая ракета, транзистор и так называемые интегральные схемы, являющиеся «нервными клетками» любого компьютера.

Особенно усилились темпы научно-технического прогресса за последние 25—30 лет. Довольно много революционных преобразований произошло в физике. Ломались устоявшиеся представления о картине мира, неизменно менялись казавшиеся незыблемыми законы. Ранее бесперспективные направления оборачивались магистралями научно-технического прогресса. «Науки-замарашки», существовавшие исключительно за счет энтузиазма чудаков-экспериментаторов, стали вдруг выходить на передовые рубежи НТР. Прорвал звездный час и для «Золушки», прозябавшей на задворках физической оптики. Родилась новая наука, настоящее чудо XX века — голография.

Слово «голография» греческого происхождения. Оно состоит из двух частей: «голо» — по-гречески означает «полный», «целый», «весь», а «графо» — «пишу». Таким образом, «голография» — это «полное описание». Описание чего? Оказывается, тех электромагнитных волн, которые излучает каждый предмет.

Да, именно каждый, поскольку любое тело, температура которого больше абсолютного нуля (-273° по Цельсию), излучает электромагнитные волны.

Исторически сложилось так, что вначале голография имела дело со световыми волнами видимого спектра, т. е. только теми, которые замечает наш глаз. Здесь голография, оправдывая свое название, позволила «полностью описать» наблюдаемый предмет, создать ничем не отличимую от него копию, «прочувствовать» его объемность, все оттенки цветов. Эта копия «консервировалась» в тонкой стеклянной пластиночке — голограмме. Стеклянная пластиночка — как бы иллюминатор в волшебный мир «замороженного света». Стоит заглянуть в него, и свет оживает, играют блики, глаз различает многообразие красок. Напрашивается сравнение голограммы с цветной объемной фотографией. Но подобное сравнение будет далеко не полным. Ведь, скажем, сколько бы мы ни крутили головой, глядя на самый совершенный фотопортрет, мы не увидим человека со спины, а голограмма позволяет сделать это удивительно просто. Более того, голография позволяет воспроизвести портрет человека, находящегося за матовым стеклом, так же хорошо, как если бы перед ним не было никакой преграды. Между тем хорошо известно, что подобные шутки не под силу обычной фотосъемке.

Но чудеса голографии на этом не кончаются. Она позволяет «замораживать», а затем «оживлять» не только видимый свет, но и электромагнитные волны любого диапазона. Напомним, что видимый свет — это лишь узенькая «замочная скважина», позволяющая человеку наблюдать внешний мир. Поскольку практически все тела излучают электромагнитные волны, причем самых разнообразных диапазонов, наши глаза видят очень немногое. Все остальное остается как бы за кадром. Так, например, человеческое тело испускает тепловые или инфракрасные лучи. Но мы их не видим. Как, впрочем, невидимы для нас ультразвук и радиоволны. А между тем эти волны несут «тонны» информации и широко используются в биологии и медицине. Они диагностируют и излечивают многие заболевания, парусят динамики громкоговорителей, вызывают курс океанским лайнерам и самолетам, заводят на посадку космические корабли, несут ценнейшие

сведения из безбрежных просторов звездных галактик. И здесь на помощь приходит голография.

Голографический видеоскоп своевременно обнаруживает недоступные другим (в том числе и рентгеновским) методам изъяны в оптических линзах и конструкциях современного весьма сложного медицинского оборудования. Голография помогает контролировать качества изделий из керамики, фарфора, стекла, кварца, пластмасс, которые, как известно, «слишком прозрачны» для рентгеновских лучей. Голографические приборы высвечивают внутреннюю структуру непрозрачного для белого света предмета. Более того, они создают «эффект присутствия», давая цветное объемное изображение оболочки, выстилающей предмет изнутри. А это чрезвычайно важно в медицине, особенно при исследовании мягких тканей органов пищеварения или других жизненно важных систем, когда рентгеновские лучи становятся бессильны. Голография позволяет как бы «заморозить» быстротекущие процессы — от биения сердца до полета пули, движения воздушных потоков в аэродинамической трубе, имитации повреждений при дорожно-транспортном происшествии и процесса образования плазмы в ядерном реакторе. В результате стремительные частицы или клетки как бы останавливаются, что облегчает их изучение в различных сечениях рабочей камеры, под удобными углами зрения. Недалек тот день, когда голография полностью вытеснит фотографию. Залогом этого является чрезвычайная простота получения голографического объемного цветного изображения. Ведь для этого не нужны хорошо полированные линзы, сложные и дорогостоящие объективы и оптика.

В недалеком будущем не только в медицинских клиниках и биологических лабораториях, но и в наших квартирах появятся голографические цветные телевизоры, которые дадут «парящее в воздухе» изображение, ничем не отличимое от реального. Распахнет двери первый в мире голографический кинотеатр.

Надо сказать, что когда зрительный зал или тем более квартира наполняется двигающимися, а то и мчащимися людьми, которые легко сходят с экрана и продолжают жить «в новом измерении», человеку порой становится не по себе. Специалисты говорят о необходимости постепенной психологической подготов-

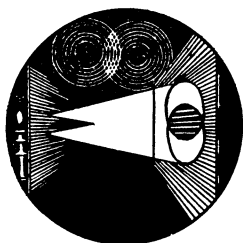
ки к такому высокоэмоциональному зрелищу. Ведь ничего подобного человек не знал раньше. Известный советский ученый Л. Д. Бахрах сказал: «Голография позволила техническими средствами создать принципиально новый орган восприятия, не эквивалентный никакому из человеческих!»

Но все эти трудности — как технологические, так и психологические — вполне преодолимы. «Только на основе ускоренного развития науки и техники могут быть решены конечные задачи революции социальной — построено коммунистическое общество»¹, — сказал Генеральный секретарь ЦК нашей партии, Председатель Президиума Верховного Совета СССР Л. И. Брежнев с трибуны XXV съезда КПСС. На съезде отмечалось также, что «практическое внедрение новых научных идей — это сегодня не менее важная задача, чем их разработка»². Особенно актуальны эти слова применительно к голографии — новой, но бурно развивающейся науке.

¹ Материалы XXV съезда КПСС. М., Политиздат, 1976, с. 47.

² Там же, с. 48.

Глава 1 Голография начиналась так ...



Голография как наука официально родилась в 1947 г., когда английский физик Дэннис Габор поставил свой замечательный эксперимент, который теперь входит во все учебники физики.

Габор, венгр по происхождению, еще перед второй мировой войной переехал в Англию. Здесь он стал работать в маленькой лаборатории одной из лондонских фирм. Надо сказать, что замечательное открытие пришло к Габору в общем-то случайно. Это, по-видимому, обусловило недостаточное внимание коллег к полученным результатам и сравнительно длительный период забвения.

Шел второй послевоенный год. Жители Лондона постепенно отвыкали от бомбежек и ледящего душу воя самолетов-снарядов. Восстанавливались заводы и научные лаборатории. Габор продолжил работу над совершенствованием электронного микроскопа. Точнее, он пытался улучшить четкость изображения, даваемого таким микроскопом. К тому времени максимальное увеличение оптических микроскопов было достигнуто. Повышение качества обработки стеклянных линз не давало никакого эффекта. Оптический микроскоп не

мог уже увеличивать в принципе. Между тем и ученым, и инженерам требовалось изучать все более мелкие объекты из царства микромира.

Выход был найден с открытием электронных волн. Эти волны значительно короче световых. Кратность увеличения микроскопа, или его разрешающая способность, зависит от диапазона волн, используемых для подсветки. Облучая вещество не пучком видимого света, а пучком электронных волн, мы увидим детали, недоступные даже самому мощному оптическому микроскопу. Благодаря электронному микроскопу ученые повысили предел разрешения в сотни раз и стали наблюдать даже крупные молекулы.

Но вот дальнейшее повышение кратности увеличения электронного микроскопа застопорилось. Дело в том, что для фокусировки электронных пучков в нем, как и в оптическом микроскопе, используются линзы, но линзы особенные: не стеклянные, а электронные. У электронной линзы появилась болезнь, называемая абберацией, устранить которую никак не удавалось. Между тем успешно лечить ту же болезнь — абберацию для линз, сделанных из стекла, научились еще в XVIII в. Габор предложил следующий способ устранения абберации электронной линзы: преобразовать электронную волну в световую, «подлечить» ее (устранив хорошо изученную оптическую абберацию), вновь преобразовать в электронную и эту электронную, очищенную от абберации, волну использовать в дальнейших исследованиях. Так удавалось повысить кратность увеличения электронного микроскопа. Правда, удавалось пока в теоретическом плане. Ведь для лечения световой волны ее нужно хотя бы на время «остановить», а еще лучше — «законсервировать», чтобы без помех уложить на «операционный стол». Перед Габором встала новая задача: как получить моментальный портрет или своего рода фотографию световой волны.

Но прежде чем приступить к рассказу о решающем опыте, подарившем миру голографию, напомним основные свойства света.

Сейчас этим не удивишь и школьника.

Но еще два столетия назад в науке безраздельно господствовала так называемая корпускулярная теория великого Ньютона. Колоссальные успехи, достигнутые Ньютоном в механике, оказали решающее влияние на объяснение им и оптических явлений. Строгая прямолинейность распространения света, на которое обратили внимание еще древние греки, утвердила Ньютона в мысли, что свет — это поток мельчайших светящихся частичек — корпускул. По Ньютону, корпускулы вылетают из источника света подобно дробинкам из ружья.

Первым, кто провозгласил, что свет — это волна, был Христиан Гюйгенс Цюйлихен.

В 1678 г. Гюйгенс читает членам Парижской академии наук свой «Трактат о свете». В нем были такие строки: «Если принять во внимание... что лучи света проходят один через другой, не мешая друг другу, то станет совершенно понятным, что когда мы видим светящийся предмет, то это не может происходить вследствие переноса световой материи, доходящей до нас от этого предмета наподобие пули или стрелы, пересекающих воздух...»

Категорически отказавшись от гипотезы о световых частицах, Гюйгенс высказал предположение, что свет распространяется так же, как и звук, сферическими поверхностями или волнами. «Я называю эти поверхности,— писал Гюйгенс,— волнами по сходству с волнами, наблюдаемыми на поверхности воды, в которую брошен камень».

Эти слова обычно рассматриваются как первое изложение волновой теории света.

Согласно принципу Гюйгенса каждая точка пространства, до которой дошла световая волна, сама становится источником вторичных световых волн. Результатирующая поверхность, огибающая эти вторичные «линии-волны», представляет собой поверхность волнового фронта.

Световой луч огибает препятствие

Но если свет — волна, то он должен, подобно волне, огибать препятствие, поставленное на его пути. Действительно, мы не раз могли наблюдать, как волна, возникшая на поверхности пруда, огибает сваи, плавающие на воде предметы.

Но то волны водяные, а попробуйте заглянуть в щель двери. Каждый на основе собственного опыта может сказать, что он видит ровно столько, сколько позволяет вырез щели. Свет никуда «не загибается», и мы видим обстановку комнаты только в узком секторе прямолинейно распространяющегося светового луча. В чем же дело? Ведь если свет — волна, то мы обязаны видеть через щель гораздо больше.

Оказывается, такое проявление волновой природы света, как огибание препятствия, мы замечаем только тогда, когда размеры этого «ставшего поперек луча» предмета сравнимы с длиной световой волны, а она очень мала: меньше одной тысячной миллиметра. Естественно, и препятствие должно быть очень маленьким.

Явление дифракции — так называют огибание световой волной препятствия — наблюдали еще в начале XVIII в. Однако объяснить его удалось только в 1818 г. французскому инженеру О. Френелю. Френель представил свои результаты на конкурс Парижской академии наук. Работу рассматривали выдающиеся ученые того времени Лаплас и Пуассон. Они считали Френеля выскочкой и дилетантом в математике. Кроме того, они были «несгибаемыми ньютонцами», т. е. никак не хотели уверовать в волновую природу света. Тем не менее научная добросовестность всех членов академической комиссии была выше подозрений. При чем Пуассон столь глубоко изучил представленный на конкурс доклад, что сумел обнаружить удивительный вывод, вытекавший из расчетов Френеля. «Позвольте, — ехидно улыбнулся Пуассон, обратившись к «провинциальному дилетанту», — из ваших расчетов следует, что свет, как морская волна, обогнет и сплошной черный диск». «Именно так, ваша честь», — потупил голову Френель. «Значит, — торжествующе заключил Пуассон, — в центре его тени появится светлое пят-

нышко, как если бы в диске было пробито отверстие. Но диск-то сплошной. Это же абсурд!»

Авторитетная комиссия согласилась с мнением Пуассона, что подобное противоречит здравому смыслу. Правда, она не отвергла с порога довольно странно звучащие доводы дорожного инженера, а мудро рассудила, что лучший судья — практика. Она предложила Френелю подтвердить разработанную им теорию дифракции опытом.

Решающий эксперимент проводил нейтральный судья — французский физик Араго. Каково же было удивление Пуассона, когда оказалось, что его первоначальный вывод полностью соответствует действительности. Но тем самым он еще раз подтверждал справедливость расчетов Френеля!

В центре тени, отбрасываемой сплошным диском, действительно наблюдалось светлое пятнышко. «Здравый смысл» был посрамлен, и волновая теория восторжествовала. Френель получил причитающуюся премию академии наук. В память об этом историческом курьезе злополучное светлое пятно в центре геометрической тени стало называться «пятном Пуассона».

Свет может гасить свет!

Но, пожалуй, самым убедительнейшим доказательством того, что свет — волна, является такое физическое явление, как интерференция.

Тонкая пленка бензина на асфальте щедро одаривает нас радужным разноцветьем павлиньего пера. Это пример интерференции. Именно интерференция света делает мыльный пузырь достойным детского трепета и восхищения.

Что же такое интерференция? Интерференция — это явление, которое наблюдается в результате сложения двух волн. Впервые правильно объяснил его талантливый английский врач и физик Томас Юнг.

Еще в юношеском возрасте Юнг опубликовал свою первую книжку «Наблюдения над процессом зрения». В ней на основе своих опытов он ставил под сомнение корпускулярную теорию света Ньютона. Однако в то время авторитет Ньютона был так велик, что молодого ученого осмеяли. Под давлением критики ученых того

времени Юнг публично признал необоснованность своих научных взглядов и забросил опыты, но мысли о том, что же представляет собой свет на самом деле, он не оставил.

Однажды в книге Юнг натолкнулся на сообщение, что вблизи Филиппинских островов ученые не раз наблюдали необычайно высокие и бурные морские приливы. Юнг посмотрел название книги. По иронии судьбы, это был третий том знаменитого труда Ньютона «Математические начала натуральной философии». Великий Ньютон объяснял (и совершенно справедливо) подобное явление взаимным наложением приливных волн.

Этот частный пример был толчком, изначальным импульсом, породившим лавину научных открытий. Юнга буквально озарило: «Представьте себе ряд одинаковых волн, бегущих по поверхности озера... Представьте себе далее, что по какой-либо аналогичной причине возбуждена другая серия волн той же величины, проходящих... с той же скоростью одновременно с первой системой волн. Ни одна из этих систем не нарушит другой, но их действия сложатся, если... вершины одной системы волн совпадут с вершинами другой системы; если же вершины одной системы волн будут расположены в местах провалов другой системы, то они в точности заполнят эти провалы и поверхность воды останется ровной. Так вот, я полагаю, что подобные явления имеют место, когда смешиваются две порции света; и это наложение я называю общим законом интерференции света».

Свою гениальную догадку Юнг подкрепил знаменитым, вошедшим во все школьные учебники опытом. Опыт столь же прост, сколь и гениален. Он не требует никаких линз, зеркал, ювелирно выточенных стеклянных призм и прочей оптической амуниции.

В куске картона Юнг проколол булавкой две маленькие дырочки. Затем он поставил картон на пути тонкого лучика света, сочившегося из щели в ставне. После картона лучик как бы раздваивался и попадал на бумажный экран. И тут возникло настоящее чудо: на экране, где по здравому смыслу должно было быть яркое световое пятно, вдруг возникли черные полосы. Этот факт находился в вопиющем противоречии с корпускулярной теорией Ньютона. Ведь добавление

друг к другу световых частичек — корпускул всегда должно вести к увеличению интенсивности суммарного светового луча. А тут свет, прибавленный к свету, вызывал темноту. Свет гасил свет! Значит, световой луч — это не «светящиеся дробинки», а самая настоящая световая волна. А раз так, то световые волны, подобно морским, могут как усиливать, так и ослаблять друг друга. Если же две волны имеют одинаковые амплитуды, а одна подошла к экрану спустя половину периода колебаний (в противофазе), то по правилам арифметики они вычтутся и уничтожат друг друга. В результате мы получим нуль, т. е. темную полосу на экране. Так на экране возникает зеброподобный черно-белый рисунок, или интерференционная картина.

Габор — архитектор световой волны

Вот эти три фундаментальных положения оптики — волновая природа света, дифракция и интерференция — и лежат в основе голографии. Все они были не просто известны, но и досконально изучены еще полтора столетия назад. Требовалось совсем немного: нужен был пытливый ум, объединивший все эти три положения воедино, чтобы голография родилась еще в XVIII в. Но в том-то и дело, что развитие науки идет не по прямой линии, а по незримым виткам спирали.

Итак, Лондон, 1947 год. Габор пытается сделать моментальный снимок световой волны, воссоздать испускаемый предметом волновой фронт. Оторвавшись от предмета, световая волна начинает собственную жизнь. Она уже никак больше не связана с ним, не принадлежит ему, подобно облачку дыма, оторвавшемуся от костра. Значит, именно в световой волне, и только в ней и заключена вся информация о предмете. Поймав волну, мы узнаем о предмете абсолютно все.

Но как же можно остановить, «заморозить» световую волну?

Вспомним эпизод из «Приключений барона Мюнхгаузена», когда однажды звуки охотничьего рожка замерзли, а после в теплой комнате оттаяли, и рожок заиграл сам.

«Заморозить» звуковую волну удалось. Уже давно изобретен тот «волшебный рожок» — фонограф, прочно

вошли в наш быт долгоиграющие пластинки, магнитофон и стереофонические проигрыватели.

Казалось бы, изобретение фотографии решило проблему со световой волной. Но возьмем в руки любую фотографию. Она бесстрастно зафиксировала всю информацию о заснятом предмете. Но всю ли?

Отчего на фотоснимке все получается плоским

Глядя на фотографию, мы не получаем впечатления объемности, как бы мы ни крутили головой. Если на снимке перед домом стоит автомобиль, то он закрывает все, что находилось за ним в момент съемки. Изображение выглядит плоским, пропадает эффект присутствия. Особенно резко выражены эти явления, когда мы рассматриваем фотоснимок при косом его расположении.

Почему же фотография не дает нам информации об объемности окружающего мира?

Еще раз вспомним, что свет — это волна, и как любая волна характеризуется двумя главнейшими величинами: амплитудой и фазой. А фотография дает нам информацию только об амплитуде излученной предметом световой волны и ничего не говорит о ее фазе. Значит, фотография не дает ровно 50% информации о заснятом предмете.

Почему так происходит?

Чувствительный слой пленки (фотоэмульсия) реагирует только на интенсивность падающего на него света, т. е. на амплитуду световой волны. Действительно, те части предмета, которые были сильнее освещены при съемке, те и вышли ярче на фотоснимке. Те, что слабее — менее ярко. Амплитуду световой волны, посланной каждой точкой предмета, фотопленка уловила, а вот фазу этой же световой волны она не чувствует, не реагирует на нее. Но именно фаза световой волны и дает нам информацию об объемности предмета! А раз ее нет, снимок получается нежизненным, плоским.

Казалось, выход есть: дополнить фотоаппарат специальной приставкой (как говорят инженеры — детектором), реагирующей на фазу.

Из школьного учебника по физике известно, что длина световой волны (λ) равна скорости света (c), деленной на частоту световых колебаний (ν). Значит, эта частота $\nu = c/\lambda$. Отсюда видно, что световая волна колеблется с сумасшедшей частотой: $3 \cdot 10^{14}$ Гц. Попробуй тут уловить ее фазу, определить насколько одна волна придет позже другой! Все существующие приемники света (в том числе и фотопленка) просто не успевают реагировать на столь быстрое изменение, они слишком медлительны, инерционны для световой волны.

Где же выход? Значит ли это, что измерить фазу световой волны невозможно и остается только смиряться со сложившимся положением вещей — неизбежной потерей 50% информации на каждом снимке?

Но в том-то и состоит заслуга Габора, что он не опустил руки, как тысячи его предшественников.

Альпинисты подсказывают метод

Вспомним, как поступают альпинисты, когда хотят измерить высоту покоренной вершины. Идя в горы, они берут с собой не раскладной метр или мерную веревку, а маленький прибор — высотомер, который автоматически показывает какой высоты достиг альпинист. Шкала прибора проградуирована в метрах, но прибор измеряет вовсе не метры и километры. Он измеряет... давление воздуха.

Существует строгая закономерность между атмосферным давлением и высотой подъема. Чем выше в горы, тем воздух разреженнее. Каждой высоте соответствует свое атмосферное давление. Так, измеряя одну физическую величину — давление газа, мы находим совершенно другую — высоту подъема альпиниста.

А нельзя ли подобный метод использовать для того, чтобы найти фазу световой волны? И Габор обратился к интерференционной картине.

Вспомним, что зеброподобный интерференционный рисунок порожден сложением двух световых волн. Черные полосы получились там, где волны пришли в противофазе, т. е. со сдвигом фаз в 180° , а светлые полосы — там, где волны действовали в такт, согла-

сованно, без сдвига фаз. Остальные участки — сероватые места интерференционной картины — соответствуют промежуточным случаям, когда сдвиг фаз между волнами есть, но меньше или больше 180° . Таким образом, интерференционная картина содержит в себе информацию о фазе световой волны. Правда, о фазе результирующей суммарной волны, получившейся в результате интерференции. Но и это уже кое-что!

Рождение голографии

Габор взял маленький полупрозрачный кубик и осветил его ярким светом ртутной лампы. По тем временам это был наилучший источник световых волн с постоянной длиной волны. Грани кубика засверкали — он сам засветился. Разумеется, засветился не своим светом, а отражая свет ртутной лампы (рис. 1а).

На пути световых волн, отражаемых кубиком, и световых волн, испускаемых ртутной лампой, Габор поставил высокочувствительную фотопластинку. Она стала играть роль экрана (в опыте Юнга экраном служил чистый лист бумаги).

Волна от лампы (B_1) стала складываться с волной от кубика (B_2). В результате такого сложения или интерференции родилась новая суммарная световая волна: $B_3 = B_1 + B_2$.

Ее-то и поймала фотопластинка. Таким образом, на фотоэмульсии зафиксировалась интерференционная картина — чередующиеся черные и светлые полосы. Заснятую на фотопластинке интерференционную картину Габор назвал голограммой.

Проявленная фотопластинка была исполосована рядами черно-белых полос. Понять, что на ней изображе-

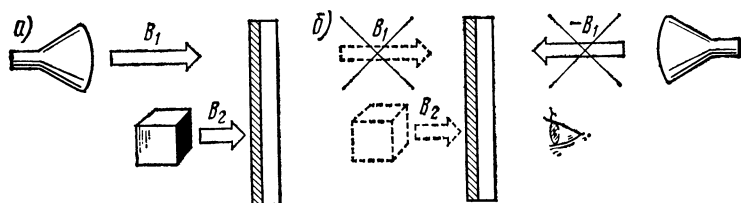


Рис. 1. Упрощенная схема голографирования

но, было нельзя. Казалось, что пластинку просто засветил неряшливый фотолюбитель. И тем не менее на пластинке был запечатлен полный портрет световой волны: ведь фотоэмульсия прореагировала как на амплитуду, так и на фазу суммарной волны. Практическая ценность подобного светового коктейля, казалось бы, была невелика. Но Габор придерживался иного мнения.

Желая воссоздать, или, как он говорил, «реконструировать» световую волну от любого предмета, Габор выбрал для начала объект простейшей формы — кубик. Удача пришла: испускаемую кубиком световую волну удалось «заморозить». К сожалению, не одну, а вместе с «пустой породой»: волной B_1 . Таким образом, фотоэмульсия стала своего рода «световой рудой». Как же теперь «выплавить» из нее «металл» — изначальную световую волну?

Если искомую световую волну обозначить через B_2 , то $B_2 = B_3 - B_1$.

Таким образом, чтобы знать, чему равна B_2 , надо знать величины B_3 и B_1 . Величина B_3 нам известна: она «законсервирована» в фотоэмульсии. А вот величина B_1 ?

И здесь Габора выручило то, что свет ртутной лампы (волна B_1) обладает замечательным свойством. Эта лампа не только ярко светит, но и излучает свет, обладающий постоянной длиной волны и другими очень стабильными характеристиками, которые в оптике давно изучены. Можно утверждать: величина B_1 тоже известна!

Но как вычесть из одной волны другую? Одно дело вычитать, скажем, яблоки, железнодорожные вагоны и даже километры, и совсем другое — световые волны, которые летят с бешеной скоростью. Ведь вычесть-то надо не на бумаге!

И Габор предложил простой и оригинальный метод. Он заменил вычитание сложением. Ведь вычесть волну B_1 — это то же самое, что и прибавить волну $-B_1$. Знак «минус» означает: волна идет в обратном направлении.

Как же выглядела схема знаменитого эксперимента Габора? (рис 16).

Он поставил справа от голограммы ту же самую ртутную лампу, что использовал раньше. Только

теперь свет от нее шел не слева направо, а наоборот — справа налево. Эта волна натолкнулась на черно-белое сито голограммы. В результате дифракции слева за голограммой возникли те же самые волны, которые ее породили, т. е. волны B_1 и B_2 . Но волна B_1 в точности равна волне ($-B_1$) и направлена ей навстречу. Значит, эти волны уничтожаются, погашая друг друга. Останется только волна B_2 . Но это и есть «размороженная» волна от кубика! Глаз, заглянувший в голограмму, как в окошко, увидит плавающий в воздухе кубик!

В первый момент Габор был поражен: он ясно различал тени на гранях, даже маленькие выщерблинки. Изображение было настолько реальным, что его хотелось потрогать, проверить наощупь.

Габор протянул руку, и она захватила... пустоту. Как он мог забыть! Ведь это же было всего лишь фантомное, мнимое изображение предмета. За голограммой находился не предмет, а реконструированная световая волна предмета. Но человеческий глаз не ощущал подмены!

Оказывается, человеческий глаз тоже можно обмануть. Ведь глаз — это своего рода оптический прибор. А у каждого прибора, пусть даже очень совершенного, есть своя ахиллесева пята.

Глава 2 Глаз

как оптический прибор



Давайте заглянем в наш глаз...

Наш глаз напоминает телескоп, который помещен в специальный мышечный подвес. Благодаря этому глаз может поворачиваться в специальном ложе — глазнице, наводиться в нужном направлении. Глаз имеет форму почти шара и размещается в непрозрачном эластичном чехле — склере. Впереди у склеры находится «иллюминатор» — роговица. Роговица представляет собой довольно плотную прозрачную оболочку, сквозь которую мы и видим внешний мир. Склера выстлана изнутри сосудистой оболочкой, богатой кровеносными сосудами. Они несут глазу кислород и питательные вещества. Спереди сосудистая оболочка переходит в радужную. Ее иногда называют просто радужкой. Радужка — мускулиста: она содержит много мельчайших мышечных волокон. В центре радужки находится круглое отверстие — зрачок. Световые лучи, пройдя сквозь роговицу и зрачок, попадают в миниатюрный «бассейн», который был бы мал и для Дюймовочки. Это так называемая передняя камера, наполненная прозрачной влагой.

Одной стенкой «бассейна» служит роговица, а другой — маленькая линзочка-хрусталик. За хрусталиком расположено массивное студенистообразное стекловидное тело, высланное сетчаткой — оболочкой, чувствительной к световым лучам.

Своим названием сетчатка обязана слову «сеть». Если взглянуть на сетчатку в микроскоп, мы увидим густейшую сеть кровеносных сосудов. Но это не главное. Сетчатка напигована специальными нервными образованиями — фоторецепторами. Именно они превращают свет в электрические импульсы — язык, на котором говорит наша нервная система.

Не сразу человек понял, что сетчатка — это первая ступенька зрительного пути.

В 1604 г. знаменитый астроном Иоганн Кеплер высказал предположение, что сетчатка — это своего рода экран, на который падает изображение, преломляющееся в хрусталике. Эта гипотеза была экспериментально подтверждена только спустя двадцать лет.

Открытие фоторецепторов было сделано много позже, после изобретения микроскопа. Только в 1835 г. фоторецепторы были впервые описаны известным медиком Тревиранусом, надо сказать, не совсем точно.

Сетчатка представляет собой часть мозговой коры, вынесенной вовне и ставшей чувствительной к свету. Сетчатка содержит также типичные мозговые клетки, расположенные между фоторецепторами и зрительным нервом, ведущим в мозг. Эти клетки и определяют электрическую активность фоторецепторов. Таким образом, процесс зрительного восприятия, протекающий в глазу, является неотъемлемой частью деятельности мозга.

Фоторецепторы, находящиеся в сетчатке, бывают двух видов: «палочки» и «колбочки». Они названы так из-за своей формы, хорошо различимой под микроскопом. Можно сказать, что в человеческом глазу имеются две переплетающиеся друг с другом различные сетчатки: «колбочковая» и «палочковая». Колбочки включаются в работу, если в глаз попадает достаточно много света, например днем. Они же позволяют человеку различать цвета. Палочки же начинают работать при тусклом освещении (ночью) и позволяют человеку только различать оттенки серого цвета. Центр сетчатки (он носит название фовеа), где кол-

бочки расположены особенно плотно, дает наилучшее зрительное воспроизведение деталей и цветов, но оказывается менее чувствительным, чем периферическая часть, заполненная более примитивными палочками.

На свету и в темноте

Когда мы произносим строки поэта: «Мороз и солнце. День чудесный!..», в нашем воображении формируется образ яркого солнечного дня в самом разгаре зимы. Мы как бы видим разлитые вокруг нас потоки света, интенсивность которого многократно усилена белоснежной поверхностью искрящегося снега. Нарисованная картина так эмоционально сильна, что, сопереживая с поэтом, мы мысленно прищуриваемся, готовясь принять раздражающий глаз залп необычайно ярких солнечных лучей.

Интенсивность света — это, по существу, энергия светового потока. Она может быть измерена с помощью приборов, подобных экспонометру.

Интенсивность света, воспринимаемая нами яркость — наиболее простое, доступное из всех зрительных ощущений. Противоположное ему — темнота.

Наше ощущение яркости во многом зависит от того, как мы приспособились (адаптировались) к падающим в глаз световым лучам. Воспринимаемая нами яркость зависит не только от интенсивности света, падающего на сетчатку, но также и от того, насколько долго облучалась наша сетчатка.

По опыту мы хорошо знаем, что если некоторое время побудем в темноте, то наш глаз приобретает большую чувствительность. Благодаря этому свет даже маленького фонарика кажется нам ослепительно ярким. Это свойство человеческого глаза обусловлено так называемой темновой адаптацией.

Что же происходит в темноте при адаптации? Было установлено, что при этом в глазу восстанавливается специальное вещество — зрительный пигмент (родопсин), который обесцвечивается при попадании на него света. Кстати, благодаря этому обесцвечиванию и происходит работа фоторецепторов (палочек и колбочек), начинающих посылать электрические импульсы по зрительному нерву в мозг.

Разумеется, кроме химических изменений внутри глаза, в процессе зрения действуют и иные механизмы. Например, после привыкания (адаптации) глаза к темноте, хотя чувствительность глаза и возрастает, зато падает острота зрения, т. е. утрачивается способность различать очень мелкие детали. Это непростое явление, и оно связано отчасти с тем, что глаз вынужден теперь накапливать (интегрировать) световую энергию с большей площади сетчатки, т. е. от большего числа фоторецепторов. Значит, увеличивается время, за которое накопится достаточный сигнал, который может быть послан по зрительному нерву в мозг.

Как мы воспринимаем окружающий мир

Некоторые органы человека парные, что не только повышает их надежность, но дает нечто качественно новое.

Например, оба наших глаза (как, впрочем, и уши) работают не сами по себе (независимо один от другого), а в тесном взаимодействии. Они совместно воспринимают и сличают зрительную информацию. Благодаря этому человек начинает воспринимать то, что было бы недоступно одному глазу или одному уху.

Человеческие глаза разделены расстоянием примерно в шесть с четвертью сантиметров. Естественно, каждый из них смотрит на мир «под своим углом зрения» и поэтому дает на сетчатке различные изображения. В этом легко убедиться, если закрыть сначала один глаз, а потом другой. Любой (особенно близко расположенный) предмет будет казаться смещенным, если попеременно зажмуривать то левый, то правый глаз. Это небольшое различие между изображениями на сетчатках левого и правого глаза известно под названием диспаратности. Благодаря ей возникает восприятие глубины или так называемое стереоскопическое зрение.

Подобное явление используется в стереоскопе. С его помощью раздельно левому и правому глазу предъявляются в общем-то очень похожие, но все же отличающиеся плоские картинки. Эти картинки образуют так называемую стереопару. Ее можно получить, например, если заснять один и тот же предмет двумя

фотокамерами (левой и правой), расположенными одна от другой на расстоянии глаз. При взгляде в окошечки стереоскопа на сетчатках левого и правого глаза получают диспаратные изображения, которые мозг воспринимает как одно целое, причем объемное (стереоскопическое).

Объемному видению окружающего мира нам помогает специальный зрительный механизм — конвергенция. Конвергенция — направление глаз в одну точку — позволяет оценить расстояние до интересующего предмета.

Напомним, что яблоко глаза может свободно вращаться в орбите. Чтобы лучше рассмотреть заинтересовавший нас предмет, мы совершенно произвольно (рефлекторно) поворачиваем глаз таким образом, чтобы лучше видеть предмет. При этом оптические оси левого и правого глаза поворачиваются так, чтобы они были нацелены на предмет. Вот такое изменение положения глазных оптических осей и есть конвергенция.

Мускульное усилие, требующееся для конвергенции, приучает нас оценивать расстояние. Для того чтобы увидеть очень близкий предмет, требуется большое усилие глазной мышцы. Таким образом, угол конвергенции может служить мерой расстояния до предмета (чем этот угол меньше, тем меньше напрягается глазная мышца и тем дальше от нас стоит предмет).

Интересно, что оптические дальномеры действуют по этому же принципу. Две зрительные трубы находятся на постоянном расстоянии друг от друга. Оно называется базой дальномера. Каждая из труб фокусируется на интересующий предмет наблюдения. У дальномера есть кольцевая шкала, по которой угол раствора зрительных труб (угол конвергенции) сразу же переводится в расстояние до предмета.

У подобного дальномера есть существенный недостаток. В данный момент времени он может показывать расстояние лишь до одного выбранного предмета. А как быть, если их несколько или даже много?

И вот здесь человеку помогает совместная работа двух механизмов объемного видения мира: стереоскопического восприятия глубины (т. е. диспаратности) и конвергенции. Угол конвергенции как бы корректирует стереоскопическое восприятие глубины, он как бы придает ту или иную значимость одной и той же

диспарантности. Например, если глаза нацелены на отдаленный предмет, то даже маленькая диспарантность между изображениями на сетчатках воспринимается нашим мозгом как значительное различие по глубине.

Как мы различаем цвета

Интересно, что цветовое зрение — поистине «дар божий», удел избранных. Кроме человека, ни одно млекопитающее, включая приматов, не обладает цветовым зрением. Наши домашние животные также не видят цвета. Окружающий мир им виден как на экране черно-белого телевизора. Казалось бы, что стоящие ниже собак и кошек животные, скажем, змеи, и подавно не разбираются в цвете. Однако это не так! Цветовое зрение в высокой степени развито у пресмыкающихся, птиц, рыб, насекомых, в особенности у пчел и стрекоз.

Развитие теории цветового зрения имеет бурную историю.

Начало углубленному изучению цветового зрения положила известная работа Ньютона «Оптика».

Ньютон показал, что белый цвет не простой, а сложный и состоит из всех цветов спектра. По мере развития волновой теории света стало ясно, что каждому цвету спектра соответствует определенная длина световой волны, или, что то же самое, частота световых колебаний.

Весьма важным является вопрос: каким же образом человек различает тот или иной цвет? Иными словами, каким образом возникают различные ответы нервной системы, соответствующие различной частоте света?

Острота проблемы состоит в том, что частота излучения в видимой части спектра весьма велика. Она значительно больше, чем та частота, которую могут воспринимать наши чувствительные к свету нервные клетки — фоторецепторы. Фактически наивысшее число импульсов, которые могут передавать в секунду наши нервы, гораздо меньше тысячи. В то же время частота световых волн составляет миллиард колебаний в секунду. Невольно возникал вопрос: каким же

образом сумасшедшая частота света кодируется нашей тихой нервной системой?

Первым, кто попытался разрешить эту проблему, был уже упомянутый английский ученый Томас Юнг (1773 — 1829). Он разработал оригинальную теорию усовершенствованную в дальнейшем Гельмгольцем. Вклад Томаса Юнга в решение проблемы цветового зрения знаменитый Максвелл оценил следующим образом: «По-видимому, почти банально заявление, что цвет — это ощущение, и все же Юнг, самым искренним образом признающий эту элементарную истину, разработал первую содержательную теорию цвета. Насколько мне известно, Томас Юнг был первым, кто, исходя из хорошо известного факта существования трех первоначальных цветов, искал объяснение этому факту не в природе света, а в конституции человека» [25].

Действительно, если в глазу существуют нервные клетки — фоторецепторы, чувствительные к каждому отдельному цвету, то тогда их было бы по крайней мере вести различных типов. Однако это не так по той простой причине, что мы видим почти так же хорошо в окрашенном цвете, как и в белом. Число действующих фоторецепторов не может, таким образом, сильно уменьшаться при рассмотрении нами предмета, подсвеченного одним цветом. Следовательно, в глазу находится не много, а очень мало различных типов цветочувствительных фоторецепторов. Юнг считал, что таких типов всего три. Еще в 1801 г. он писал: «В настоящее время, когда почти невозможно представить себе, что каждая чувствительная точка содержит бесчисленное множество составных частиц, способных вибрировать в унисон с каждым возможным световым колебанием, мы приходим с необходимостью к предположению о существовании ограниченного числа рецепторов сетчатки, воспринимающих такие основные цвета, как красный, желтый и синий».

В работах, выполненных позже, Юнг по-прежнему настаивал, что число основных цветов равно трем, однако заменил красный, желтый и синий на красный, зеленый и фиолетовый.

Возможность того, что вся гамма цветов может быть получена из нескольких основных цветов, доказывается важным наблюдением: цвета можно смеси-

вать наподобие напитков в коктейле. Это может показаться очевидным и само собой разумеющимся. Однако в глазу смешение световых колебаний происходит совсем иначе, чем смешение, скажем, в ухе звуковых. Два звука нельзя смешать так, чтобы получить отличный от них третий звук, но два цвета дают третий, в котором эти составные части уже не видны. Составные звуки слышны как аккорд и могут быть выделены порознь, во всяком случае, тем, кто знает нотную грамоту. Однако сделать ничего подобного в отношении цвета нельзя.

Юнг остановился на трех основных цветах по очень простой причине. Он обнаружил, что может сконструировать любой цвет, видимый в спектре (в том числе и белый), путем смешения трех (но не менее, чем трех!) световых лучей, подбирая соответственно интенсивность света.

Итак, согласно теории Юнга—Гельмгольца существуют три типа рецепторов (мы уже знаем, что ими являются колбочки), которые откликаются соответственно на красный, зеленый и синий (или фиолетовый) цвета. Ощущения же всех остальных цветов спектра возникают при смешении сигналов этих трех типов рецепторов.

В цветовом зрении существует однако гораздо больше проблем, чем это обнаружено в экспериментах с простыми окрашенными пятнами света.

Хотя Юнг и обнаружил, что цвета спектра, включая белый, могут быть получены при смешении трех окрашенных световых лучей, таким способом невозможно получить любой цвет, который доступен нашему восприятию. Например, нельзя получить коричневый цвет, а также цвета металлов, таких, как серебро или золото. Следовательно, существует нечто сверх трех цветов, не говоря уже о двух. Что же это «нечто»?

Цветное кино — не более чем оптическое устройство, состоящее из трех одноцветных пленок, расположенных на определенных расстояниях друг от друга. Однако оно дает нам даже коричневый и другие цвета. Юнг же никак не мог получить их с помощью трех цветных лучей. По-видимому, когда три цветовых потока объединяются в сложные структуры, особенно когда они изображают предметы, мы видим большее разнообразие цветов, нежели когда те же самые цвето-

вые потоки предъявляются в виде простых световых пятен.

Все это означает, что цветовое зрение нельзя уложить в рамки простой механической схемы. Восприятие цвета обусловлено не только облучением сетчатки нашего глаза световыми волнами определенной длины, но и тем, изображает ли совокупность цветовых пятен знакомые или не знакомые нам предметы. Именно тогда включаются корковые механизмы мозговых процессов.

Для глаз белый цвет — это не специфическое смешение цветов, а скорее общее освещение, каким бы оно ни было. Так, мы видим свет фар автомобиля белым ночью в лесу или поле. Но в городе, где на улицах горят яркие лампы, свет фар кажется нам совсем желтым. То же самое происходит со светом свечи или карманного фонарика. Это означает, что нам трудно оценить белый цвет, если нет критерия, своего рода эталона, что же считать белым. Ожидание или предварительное знание обычного цвета очень важно.

Таким образом, эксперименты выявляют сложные дополнительные механизмы мозга, связанные с обработкой зрительной информации. Превращение ее в ощущения, а также само восприятие предметов — все это обеспечивается центральной нервной системой. Было бы недопустимым упрощением представлять себе зрение лишь как работу глаза и забывать о мозге.

Не печальтесь:

ошибку природы можно поправить

Наше зрение зависит от того, насколько четко на сетчатке получается изображение окружающих нас предметов. Напомним, что глаз — это оптический прибор. Значит, работа глаза зависит от того, где находится фокус системы, составленной из линз, выточенных самой природой. Если фокус лежит точно на сетчатке, изображение получается четким, отчетливым. Такой глаз медики называют нормальным, острота зрения принимается равной единице. Но при «массовом производстве» природа не могла обеспечить всех людей идеальными оптическими поверхностями, из которых состоит глаз. Поэтому эта капризная точка — фокус

гуляет по оптической оси глаза и может не попасть точно на сетчатку. В результате изображение предмета проектируется на нее не четко, размазывается, мы видим предмет с размытыми очертаниями. В этом случае острота зрения ниже нормальной. Глаз, как говорят медики, имеет «несоразмерную рефракцию», т. е. неудовлетворительную преломляющую способность.

Используя термин ракетчиков и артиллеристов, можно сказать, что промах (фокус не попал на сетчатку) может быть из-за недолета (фокус находится перед сетчаткой) или перелета (фокус позади сетчатки). В первом случае развивается близорукость, во втором — дальнозоркость.

У близорукого глаза общая преломляющая сила его линзочек слишком велика, объектив получается чересчур короткофокусным. У дальнозоркого глаза все наоборот.

Сетчатку, очевидно, не переставишь ближе или дальше. Правда, можно переставить, подвинуть одну из линзочек — хрусталик. Тогда фокус совпадет с сетчаткой. Именно так бывает у рыб. У них в случае надобности хрусталик перемещается вдоль оптической оси и изображение на сетчатке получается сфокусированным. Чтобы навести на резкость в фотоаппарате, мы, перемещая головку объектива, меняем тем самым фокусное расстояние и загоняем фокус на чувствительный слой пленки.

Человек в процессе эволюции научился фокусировать размытое изображение иначе. Кривизна одной из его линзочек — хрусталика, оказывается, может меняться. В этом и проявляется удивительный механизм аккомодации.

При взгляде на близкие предметы хрусталик утолщается и начинает преломлять световые лучи под большим углом. Таким образом, возрастает общая преломляющая способность глаза и предмет мы видим в фокусе.

Аккомодация осуществляется своеобразным способом. Напомним, что хрусталик подвешен в глазу с помощью особой мышечной мембраны. Она поддерживает хрусталик в состоянии постоянного поджатия. При взгляде на близкие предметы глазная мышца автоматически сокращается. Мембрана сразу же уменьшает степень поджатия хрусталика. Тот распрям-

ляется, и его форма становится более выпуклой. Это приводит к тому, что изображение на сетчатке сфокусируется.

Хрусталик состоит из тончайших прозрачных слоев, образующих сверхминиатюрную двояковыпуклую линзочку. Развитие хрусталика представляет особый интерес, поскольку оно имеет важные последствия в зрелом возрасте человека. Хрусталик наподобие стебелька растения или луковицы развивается из центра. Клетки хрусталика добавляются в течение всей человеческой жизни, хотя с возрастом этот процесс замедляется. Таким образом, центр хрусталика является наиболее старой его частью. Центральные клетки все более и более отдаляются от кровеносной системы, поставляющей кислород и питательные вещества, и постепенно отмирают. Когда клетки отмирают, они затвердевают. Хрусталик становится плотным и неэластичным и уже хуже изменяет свою форму, если после взгляда вдаль нам надо перевести его на близкие предметы.

Потеря эластичности хрусталика связана с естественным старением человеческого организма. Даже люди с остротой зрения, равной единице, к 40—45 годам начинают жаловаться на неприятные ощущения в области надбровья. При чтении глаза быстро утомляются, буквы начинают сливаться. Это первые сигналы о том, что аккомодационный механизм глаза работает с перегрузкой. Надо учесть, что глаз легко, без утомления может работать только в том случае, если его аккомодация расходуется не более чем на 50%. Если же такого запаса уже нет, т. е. резервы природы на пределе, следует прибегнуть к помощи искусственных оптических приборов, т. е. очкам. С их помощью мы можем читать и выполнять сложную работу в старости.

Очки в близорукое (сильно преломляющем) глазу призваны ослаблять, а в дальнозорком (слабо преломляющем) — усиливать преломляющую силу оптической системы глаза. В первом случае используются рассеивающие, а во втором — собирающие линзы.

Обычно оптическая система человеческих глаз имеет почти сферические поверхности. Так, роговицу можно считать выпукло-вогнутой сферой, а хрусталик — двояковыпуклой сферой. Но встречаются чело-

веческие глаза, в которых преломляющие поверхности несферичны. Иными словами, они имеют различную кривизну, а следовательно, и различную силу преломления. В таких глазах есть меридианы с сильной и слабой преломляющей силой, т. е. различной рефракцией. В подобных случаях глаз имеет не один, а несколько фокусов. Они по-разному расположены по отношению к сетчатке, что делает изображение нечетким. Подобная аномалия человеческого глаза называется астигматизмом.

Таким образом, астигматизм — не новый вид рефракции, а соединение в одном глазу различных рефракций или одной и той же рефракции, но разных степеней. Чаще всего астигматизм обусловлен несферичностью роговицы. Кривизна передней поверхности роговицы обычно больше в вертикальной меридиональной дольке. Следовательно, там и преломление больше, чем в горизонтальной дольке (сечение по параллели). Астигматизм, вызванный несферичностью роговицы, присущ всем глазам и носит название прямого или физиологического астигматизма. Он не влияет на остроту зрения и обычно не учитывается. Иное дело, если у человека обратный астигматизм, т. е. горизонтальные дольки преломляют сильнее вертикальных. Обратный астигматизм даже слабой степени заметно понижает остроту зрения.

Астигматизм устраняется с помощью специальных линз цилиндрической формы. Цилиндрическая собирательная линза имеет одну плоскую поверхность, а другую — цилиндрическую. Делая срезы со стеклянных цилиндров разных диаметров, получим линзу с различной силой преломления. В каждом глазном кабинете есть набор линзочек. Страдающим астигматизмом надевают специальную оправу, где в каждом гнезде имеется градусная шкала. По ней устанавливаются оси цилиндрических стекол. Обозначение осей цилиндров принято по единой для всех стран международной системе.

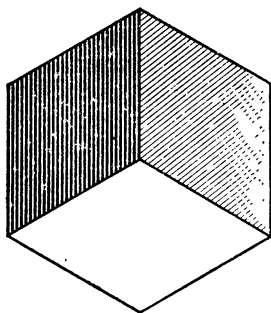
В последнее время получили распространение так называемые контактные линзочки. Они накладываются непосредственно на роговицу. Такие линзы очень удобны для людей, которые не всегда могут пользоваться обычными очками. Правда, носить их можно не более 4—5 ч в сутки.

Смотрит глаз, а видит мозг

Зрительное восприятие зависит не только от того, что воздействует на зрение, но и от того, как понимает мозг воспринимаемую картину. От такого понимания может в конечном итоге совершенно изменяться окончательный результат.

На рис. 2, а изображен кубик, видимый немного со стороны, так что глаз охватывает две боковые и одну верхнюю грань. Казалось бы, что в восприятии такого привычного рисунка не может быть каких-либо затруднений. Между тем достаточно небольшого усилия и можно заставить себя видеть вовсе не кубик, а нечто вроде разломанного ящика, у которого остались квадратное дно и две задние боковые стенки. В первом случае, когда воспринимается зрением кубик, наиболее близкой к зрителю точкой оказывается вершина кубика, где сходятся три видимые грани. Однако волевым усилием можно направить зрительный аппарат на то, чтобы увидеть разломанный ящик, у которого внутренний угол между тремя стенками оказывается наиболее далеким от зрителя.

а)



б)



Рис. 2. Рисунки с двояким смыслом.

а) Изображенная фигура может восприниматься как куб (освещенный снизу) или как частично разломанный ящик (у которого остались только дно и две задние стенки).

б) Портрет, который может восприниматься как изображение либо профиля дряхлой старухи, либо полуотвернувшейся юной красавицы с бархоткой на шее.

Известный советский ученый и прекрасный художник Г. И. Покровский говорил о том, что можно придумать множество примеров, где одно и то же изображение воспринимается двумя, тремя и более значительным числом путей. Конечно, если изображение привычно и многократно воспринималось каким-то одним способом, то другие варианты возможного восприятия остаются незамеченными или не возникают в сознании вовсе. Иногда требуется особое внимание и даже талант, чтобы увидеть в привычных зрительных образах новое, неожиданное и все же вполне закономерное и подчас более соответствующее реальной действительности, чем то, что подсказывает нам повседневная привычка.

Из сказанного следует, что зрительное восприятие основывается не только на оптической картине, возникающей в глазах под воздействием света, отраженного или излучаемого окружающими предметами, не только от бессознательного опыта, накопленного развитием жизни на Земле, но также от тех решений, которые чаще бессознательно, а иногда и сознательно принимает человек при осознании того, что он видит.

Наиболее легко и быстро воспринимаются такие зрительные образы, в которых зритель узнает то, что закреплено длительно и устойчиво привычной и бессознательной зрительной памятью. По-видимому, с этой закономерностью тесно связаны те предпосылки к эстетическому и эмоциональному удовлетворению, которое дает реалистическая живопись и скульптура. При этом нередко достаточно только небольшого намека, только нескольких характерных черт, и в сознании с поразительной силой, совершенно произвольно возникают картины поразительной яркости.

Более того, каждый интересующийся изобразительными искусствами может на собственном опыте убедиться, что удачно найденный пейзаж, портрет и т. д. может произвести куда более концентрированное впечатление, чем сама натура. В результате такого воздействия многие люди начинают глубже, ярче и многостороннее воспринимать реальную действительность.

У рассматриваемого вопроса есть и другая сторона. Речь идет о способах наиболее целеустремленной передачи зрительной информации. Художникам нередко удавалось передавать ничтожным числом простейших

штрихов метко схваченные особенности характера и настроения разных людей. Совокупность таких штрихов не имеет ничего общего с той оптической картиной человека, которая отображается на сетчатке глаза. Эти штрихи в первую очередь передают совсем другое. Они служат как бы намеком на те движения, которые производят глаза при зрительном восприятии человека или пейзажа. Условные чертежи технических объектов совершенно так же воспринимаются опытным взором специалиста, как точное воспроизведение сложнейших технических объектов.

Голограмма — это тоже набор штрихов. Причем набор на первый взгляд хаотический, никоим образом не соответствующий запечатленному («заголографированному») объекту. Но это только на первый взгляд. Стоит лишь щелкнуть тумблером, включая когерентную подсветку, и — о, чудо! — невзрачная стеклянная пластиночка преобразается в волшебное зеркало. Не по этому ли принципу работает удивительнейшее чудо природы — наш мозг? Мозг, который каким-то и по сию пору непонятным способом ухитряется в мгновение ока из мириады малюсеньких электрических импульсов воссоздать величественную картину окружающего нас мира.

Глава 3 Голография и память



Электронные волокна запоминают...

В течение всей своей жизни человек непрерывно принимает решения. При этом прежде всего происходит так называемое распознавание образов, характеризующих окружающую среду, затем классификация этих образов путем сравнения их с теми, которые известны из прошлого опыта. В случае простого условного рефлекса решение принимается автоматически. Если же речь идет о более развитом интеллекте, то сначала происходит распознавание образов, а затем — анализ последствий возможного выбора. Все эти стадии тесно связаны с тем, что мы называем памятью. В процессе распознавания образов и последующего анализа существует определенная иерархия, которая требует более обширной памяти, но роль памяти в принципе остается прежней. Таким образом, память абсолютно необходима не только человеку, но и любому живому существу. Универсальные способности к обучению тесно связаны с универсальностью памяти.

В течение многих веков память была предметом размышлений философов. Машины, наделенные па-

мью, появились уже давно; еще в XVIII в. автоматы и музыкальные шкатулки обладали каким-то подобием памяти. Но эта «память» была так убога, что никому и в голову не приходило сравнивать ее с памятью человека. С появлением электронных машин все изменилось. У этих машин действительно есть способность запоминать. Память машины хранит порядок операций, которые нужно произвести, многочисленные исходные данные предложенной задачи и все промежуточные результаты. Искусственная память развивается и очень быстро совершенствуется. Но чтобы ясно очертить проблему, нужно прежде всего вспомнить, как устроена электронная вычислительная машина и какую роль в ее работе играет память.

Если пренебречь особенностями отдельных моделей, окажется, что эти машины удивительно похожи друг на друга. Схема, изображенная на рис. 3, может быть отнесена к любой электронной вычислительной машине независимо от ее конструкции и назначения. Как показано на схеме, такая машина состоит из четырех частей: процессора, блоков памяти, управления, органов на входе и на выходе. Процессор (3) производит арифметические действия — сложение и вычитание, но это нисколько не ограничивает возможности машины, потому что умножение можно заменить серией сложений, а деление — серией вычитаний. Оперативная память (2) служит для хранения информации, необходимой при расчетах: исходные данные, последовательность операций (так называемая программа), промежуточные и конечные результаты. Комбинированный ансамбль «вход — выход» (4) обеспечивает связь машины с внешним миром: она получает данные для расчетов на входе и выдает результаты на

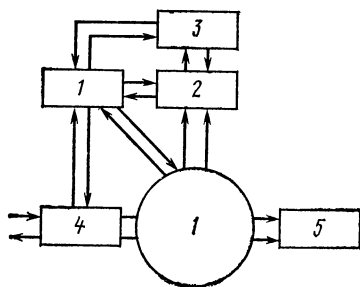


Рис. 3. Принципиальная схема быстродействующей ЭВМ

выходе. Кроме кратковременной оперативной памяти имеется еще память, хранящая информацию (5), которая приходит на помощь оперативной памяти. Блок общего управления (1) управляет всей системой, обеспечивая оптимальный режим ее работы; в каждый данный момент он осуществляет необходимую связь между всеми частями машины.

Память счетной машины может функционировать по-разному. Есть постоянная, или мертвая, память; информация записана в ней раз и навсегда, ее нельзя уничтожить или изменить. Самый простой и давно известный пример этого типа памяти — перфокарта: данные или указания программы переводятся в соответственно расположенные отверстия на бумажной карте. Органы на входе считывают эту информацию, и она легко усваивается машиной. Другой вид памяти — оперативная память; она имеет динамическую природу и действует с фантастической скоростью: информация в ней записывается и стирается за миллионные доли секунды. Но емкость ее сравнительно мала (это определяется экономией средств), и поэтому она связана с долговременной памятью. Емкость долговременной памяти может быть громадной. Современные машины способны хранить информацию, которую человек получает за всю свою жизнь.

Основная проблема памяти заключается в том, чтобы как можно быстрее отыскать записанную в ней информацию. В вычислительных машинах это осуществляется при помощи так называемого адреса. Память можно сравнить с громадной картотекой, состоящей из огромного числа ячеек. Чтобы легче найти то, что помещается в одной из этих ячеек, нужно обозначить ее номером и дать ей адрес. Процесс сложения, например, выполняется в заданном порядке (вспомним, что этот порядок — элемент программы машины): отыскивается число, находящееся в ячейке памяти, к нему прибавляется число, и результат записывается в соответствующую ячейку.

Впоследствии, если для дальнейших вычислений необходим этот промежуточный результат, машина (т. е. программа) «вспомнит», в какой именно ячейке находится результат. Это надежный метод, но он требует точных сведений о том, в какой ячейке находится нужная информация. А может случиться так, что

информация есть, а где она — неизвестно. Что же делать в таком случае?

Заметьте, что это не надуманная ситуация. И вот простой пример — механизация розыска документов. Документы — книги или журналы, поступающие на хранение, — анализируются, кодируются на языке машины, а затем регистрируются в ее памяти. Каждый документ снабжается специальными обозначениями, его краткое содержание выражают несколькими так называемыми ключевыми словами. Число документов, помеченных определенным набором ключевых слов, заранее не известно. Чтобы разыскать все документы, имеющие отношение к данной теме, ее содержание также выражают набором ключевых слов, взятых из словаря, уже использованного при составлении характеристик документов. Затем этот набор слов сравнивается со всеми наборами, характеризующими отдельные документы. Если в наборе слов определенного документа обнаруживаются все ключевые слова заданной темы, выбирают этот документ, так как именно он должен относиться к нашей теме.

Таким образом, приходится перебирать все документы, хранящиеся в памяти машины, потому что никто не имеет понятия о том, где же фактически находятся нужные документы. Это очень трудоемкий метод розыска. Тем не менее благодаря сверхвысоким скоростям работы электронных машин операция занимает немного времени, но от этого суть дела не меняется: чтобы получить ответ всего на один вопрос, приходится просматривать все документы, хранящиеся в памяти машины.

Во власти воспоминаний

Совсем иначе работает память человека. Элементарное самонаблюдение подтверждает огромную важность так называемых ассоциаций. Стоит только задать вопрос: «Что вы об этом знаете?», как в мозгу начинается процесс, в котором каждое слово вызывает в памяти новое слово. То, что человек знает «об этом», не приходится разыскивать по адресу в каком-нибудь «ящичке» мозга. Здесь, по-видимому, работают многочисленные цепи, которые производят параллельные

розыски информации на основе ассоциаций, образованных при запоминании всего, что относилось к этой теме. Разница между памятью, работающей по адресу, и ассоциативной памятью живых существ не количественная, а качественная. Было сделано несколько попыток создать запоминающие системы ассоциативного типа; они дают значительный выигрыш во времени, но за это приходится расплачиваться усложнением конструкции.

Нет ли еще более глубокого различия между памятью человека и памятью машины? В машине память точно локализована: можно увидеть своими глазами крохотные куски магнитного материала, составляющие элементарные клетки оперативной памяти или магнитную ленту долговременной памяти. Трудно устоять перед искушением найти аналогичные структуры и в человеческом мозгу, обнаружить, в каком специализированном отделе мозга хранятся запасы полученной информации. Однако все поиски в этом направлении заводили в тупик. В частности, хирургия подтвердила, что даже в тех случаях, когда из-за травмы или серьезного заболевания удаляли значительную часть мозга, на память это практически не влияло. Не потому ли ускользает ответ, что вопрос поставлен неудачно? Может быть, центр памяти не удастся обнаружить просто потому, что память не локализована в определенной части мозга, а распределена более или менее широко по всей центральной нервной системе, как, например, в персептроне³, где память о каждой категории образов, заключенная в целой серии цифровых значений коэффициентов, распределена равномерно. Локализованная память, работающая по адресу, прекрасно приспособлена для арифметических расчетов, и это доказано блестящей работой электронных вычислительных машин. А вот диффузная, «голографическая» память, пожалуй, лучше подошла бы для машин, распознающих образ и принимающих решение в условиях сложного выбора. Если это действительно так, то для бионика открывается новое поле деятельности. Но под-

³ Персептрон — электронное кибернетическое устройство, предназначенное для автоматического распознавания образов. Может использоваться в самых различных областях: для автоматической сортировки белья по фабричным меткам.

тверждается ли гипотеза диффузной памяти физиологическими данными?

Первые кибернетические исследования в области памяти опирались на следующую гипотезу: весь прошлый опыт материализован в мозгу в виде определенной цепи нейронов. Нейронов чрезвычайно много — десять миллиардов; количество элементов связи между нейронами, синапсов, в сто раз больше, т. е. тысяча миллиардов. Человек с самым смелым воображением не возьмется перечислить все цепи, которые могут образоваться из этих десяти миллиардов нейронов, связанных тысячей миллиардов синапсов.

Как же создается цепь, соответствующая данному количеству информации? Естественно предположить, что определенная чувственная информация возбуждает всегда одну и ту же цепь нейронов. От нейрона к нейрону возбуждение всегда передается по одним и тем же синапсам. Передавая возбуждение, синапсы модифицируются, и последующие импульсы передаются уже легче; таким образом, память может быть заключена в этих механизмах, облегчающих передачу импульсов. Действительно, подобные явления наблюдаются после продолжительного действия возбуждения, но они очень недолговечны: через несколько минут, самое большее через несколько десятков минут, они исчезают. Значит, этим путем нам не удастся прийти к объяснению феномена памяти, потому что ее самый существенный признак — долговечность.

Память бывает разная

Кратковременная память хорошо знакома психологам. Они измеряют ее количеством цифр или слогов, которое человек запоминает с первого раза. Для чистоты опыта цифры следуют в полном беспорядке, а слоги не составляют слов, их порядок должен быть лишен всякой логики. Емкость кратковременной памяти невелика — всего 7—8 слогов, но она удивительно постоянна для каждого индивида. Физиологическим субстратом такой кратковременной памяти может служить остаточная деполяризация синапсов.

Определенная часть информации отбирается и передается на хранение в долговременную память. Но это

требует некоторых усилий. Информация должна получить структуру, ассоциироваться с уже известной или близкой к ней информацией. Трудно объяснить, в какой форме хранится эта информация; образ любимого человека в памяти едва ли напоминает фотографию этого человека. Нервная система извлекает из массы чувственной информации основные черты, по-настоящему важные и характерные; в память они помещаются довольно экономно. В этой связи возникает естественный вопрос: известна ли нам полная емкость человеческой памяти? Этот вопрос неправильно сформулирован, потому что для ответа нужно точно знать физиологическую природу материального субстрата памяти. Его можно поставить иначе: какое количество информации человек может воспринять (а значит, и запомнить) за всю свою жизнь? На этот вопрос уже есть ответ. Многочисленные эксперименты показали, что человек может обработать один бит информации в три сотые доли секунды. Правда, это кладет пределы познавательной способности человека, но, к счастью, они довольно широкие.

Если человек может обработать примерно 20 битов информации в секунду (постоянно сохранять полное внимание невозможно), это значит, что он способен оценить почти миллион различных возможностей в секунду. Если работать в этом ритме 14 ч в день (мы берем крайний случай), то в день можно обработать миллион битов. За 50 лет среднее число составит примерно 18 миллиардов битов. Необходимость хранить эту информацию далеко не исчерпывает количество возможных комбинаций всех элементов нервной системы. Ученые показали, что для этого достаточно тысячной доли общего числа нервных клеток. Человек отыскивает в памяти нужную информацию в среднем за несколько десятых секунды; значит, скорость этого поиска должна быть около 50 миллиардов битов в секунду.

Лучшие из современных запоминающих устройств отыскивают за одну пятидесятую секунды информацию, записанную на магнитных дисках, вращающихся со скоростью 50 оборотов в секунду. Емкость такой памяти — примерно миллиард битов. Человек и машина в настоящее время отыскивают информацию с равной скоростью, но техника в этой области очень быстро

прогрессирует, так что она может обогнать человека.

Запись информации в памяти человека принципиально отличается от записи в искусственной памяти. В машине материал классифицируется по адресу, в нее достаточно ввести информацию один раз и в любом порядке. В человеческой памяти необходимо установить ассоциации, которые впоследствии помогут отыскать эту информацию. Так налаживается связь между кратковременной и долговременной памятью. На этой важнейшей стадии восприимчивость к внешним помехам повышена. Мы уже познакомились с химическими веществами, тормозящими процесс запоминания. На него могут влиять и другие факторы. Так было отмечено влияние электрошока на обучение крыс в лабиринте. Если крысы подвергались электрошоку через несколько часов после тренировок, это не сказывалось на их поведении. Но если электрошок наступал всего через пять минут после окончания тренировки, крысы начисто забывали все, чему научились. Заметное влияние электрошока наблюдалось в интервале до пятнадцати минут после окончания тренировки.

Эти и многие другие эксперименты показали, что в процессе передачи информации в долговременную память важную роль играют нервные импульсы, потому что нарушение их передачи электрошоком нарушает и передачу информации. Возможно, страдает так называемое нейрональное кольцо. Кольцо играет всего-навсего роль передатчика. Физиологи подтверждают возможность существования такого кольца. Кольцо включает в себя зрительные бугры, куда обязательно передается вся чувственная информация (кроме обонятельной), гиппокамп и ряд других отделов мозга.

Существенная роль этого кольца в передаче информации из кратковременной памяти в долговременную подтверждается патологической физиологией. Изучение последствий травм всегда было важнейшим методом в науке: разрушая орган или связь между органами, можно наблюдать явления, которые при этом возникают. Совершенно ясно, что здоровому человеку никто не решится нанести подобные травмы, но нередко сама болезнь производит в мозгу разрушения, которые обнаруживаются при вскрытии. Видов заболе-

ваний памяти, или амнезии, много; некоторые из них весьма причудливы: больной, например, прекрасно помнит все, что с ним случилось раньше, но абсолютно не способен запомнить новые события. Он никак не может привыкнуть к своей палате и не узнает своего врача. Вскрытие показывает, что этот вид амнезии связан с нарушениями в области гиппокампа: они прерывают циркуляцию информации. Экспериментальная физиология подтверждает данные патологической. Опыты на осьминогах показали, что их примитивный мозг является превосходной естественной моделью. В нем можно вызывать соответствующие нарушения и наблюдать сходные последствия.

Из всего сказанного вытекает вполне достоверный вывод: кратковременная память представляет собой деполяризацию на уровне синапсов, которая сочетается с циркуляцией нервных импульсов по определенным замкнутым контурам. Для закрепления информации в долговременной памяти необходимо, по-видимому, чтобы она достаточно долго циркулировала по контуру. Что получается при таком повторяющемся возбуждении? Оно, несомненно, влияет на синтез молекул протеинов, которые служат субстратом долговременной памяти. Заметим, что состав этих сложных химических веществ не отличается большим разнообразием. Материальная основа запоминания образа представляет собой кольцо клеток, измененных присутствием специфических протеинов. И это, кстати сказать, исключает заманчивую возможность передавать знания путем инъекций протеинов.

Выше мы задавались вопросом: рассеяна ли память человека по всей нервной системе? Похоже на то, что теперь мы имеем право утвердительно ответить на этот вопрос. А это уже шаг вперед. Инженер-бионик может и должен найти здесь новые идеи, применение которых в конструировании вычислительных машин обещает быть чрезвычайно интересным. Теперь попытаемся ответить на другой вопрос: как объяснить громадную емкость человеческой памяти? Зависит ли она от того, что нейроны сгруппированы в высокоорганизованные структуры, или от того, что они связаны между собой какими-то необъяснимыми связями? Ответа на вопрос пока что нет, хотя сейчас ведутся очень активные исследования в этой области, так что

успех, по-видимому, не за горами. Но сначала нужно гораздо глубже изучить проблему хранения информации.

Голографические следы

Голография обладает рядом свойств, которые представляют интерес для нейрофизиологии. Главным из них является свойство распределенности, которое присуще лишь голографическим процессам. Это свойство, являющееся характеристикой определенного типа голограмм, позволяет по любой малой части голограммы полностью восстанавливать записанную на голограмме исходную картину. Этот и некоторые другие факты наводят на мысль, что предположение о наличии нейроголографических процессов в мозгу может оказаться весьма полезным при исследовании процессов кодирования сенсорной информации и процессов запоминания.

Математические модели, опирающиеся на известные элементарные нейрофизиологические процессы, могут описывать также и нейроголографические процессы. Это осуществляется с помощью уравнений, заимствованных из оптической голографии, которые дискретизируются в пространстве и времени и преобразуются таким образом, чтобы сделать возможной замену формы нервного спайка набором синусоидальных колебаний, используемых в оптической голографии. Голография, основанная на преобразовании Фурье, вероятно, лучше всего подходит для создания первых нейроголографических моделей.

Ф. Вестлейком [19] было предложено объяснение возможного соответствия или изоморфизма пространства состояний голографического процесса с пространством состояний процессов нервного кодирования. На уровне голограмм наиболее вероятным является, во-первых, соответствие между фазой электромагнитной осцилляции и внутриспайковым интервалом и, во-вторых, соответствие между амплитудой и высотой нервного импульса. При необходимости высота импульса на нейроголограмме может быть ограничена и закодирована двоичной переменной «импульс — нет импульса», что позволяет изменять при желании контраст-

ность «серых пятен», возникающих при реконструкции изображения исходного объекта-стимула. Имеются нейрофизиологические данные, указывающие на то, что высота импульса, возникающего в плоскости объекта-стимула, может быть закодирована в терминах «когерентности — некогерентности», что хорошо согласуется с нейрологографическими процессами.

Если количество информации (в бит/с), проходящей между двумя обрабатывающими информацию поверхностями, превышает пропускную способность нейрона, то в таких случаях, как правило, используется несколько нейронов. Можно сказать, что совокупность или сумма отдельных носителей информации образует «волну информации». Такая волна информации может быть в общем случае представлена линией или поверхностью, проходящей через индивидуальные различающие метки, которые характеризуют или кодируют эти отдельные порции информации, какого бы рода они ни были.

При исследовании процесса прохождения волны через поверхность обычно рассматривается вся информация, которая может пройти через такую поверхность. В оптике подобный подход привел к формулировке принципа Гюйгенса—Френеля—Кирхгофа. Если рассмотреть процессы физической записи и воспроизведения волнового фронта, проходящего через отверстие диафрагмы, то опять-таки в рамках этого подхода нельзя не упомянуть о голографии, ибо голография является первым, наиболее общим описанием метода, в котором имеется возможность зафиксировать всю поступившую информацию.

Вполне возможно появление и других методов регистрации фазы или относительных временных изменений по крайней мере в области неоптических частот и, может быть, при исследовании неэлектромагнитных волновых процессов. Но в любом из подобных случаев там, где имеются относительные изменения многих повторяющихся временных циклов, удобнее рассматривать в качестве эталона для сравнения какую-то другую циклическую активность, а не фиксированный момент времени, чтобы избежать необходимости подсчета информации во всех этих циклах.

В этом смысле голография, возможно, является единственным приемлемым процессом для записи всей

волновой информации. Вполне резонно допустить, что при рассмотрении любых волновых процессов, которые включают нейроволновые процессы⁴, голографический процесс (в отличие, скажем, от прямого фотографического процесса, в котором не регистрируется фазовая информация) может оказаться наиболее пригодной основой для разработки теории записи и восстановления нейроволновых фронтов⁵, хотя сами процессы распространения подобных волн могут отличаться в деталях.

Волновые интерференционные теории мозга имеют уже довольно долгую историю, которая восходит к 1906 г. Следует указать на два значения понятия «интерференционная теория». Одно применяется некоторыми психологами в теории обучения для объяснения явлений затухания в памяти. Там говорится, что новая информация «интерферирует» со «следами», описывающими «старую» память, что приводит к забыванию запомненного ранее материала. Второе толкование этого термина связано с явлениями интерференции двух волн. Не исключено, однако, что совокупный анализ обоих истолкований обнаружил бы в них определенную общность.

Волновые интерференционные теории рассматривались и ранее. Особо следует отметить выводы Лэшли, которые во многом соответствуют идее нейроголографического процесса. Следует отметить попытку Лэшли ввести понятие «эквивалентность стимулов» [19]. Понятие «эквивалентность стимулов» применялось рядом психологов, исследовавших процессы восприятия, для объяснения того факта, что иногда разные стимулы вызывают одинаковые внутренние или внешние реакции у организма. Примером такой эквивалентности стимулов является инвариантное к сдвигам распознавание образов.

В нейрофизиологии нетрудно привести примеры, указывающие на необходимость существования процессов распознавания образов, инвариантных к размерам и смещениям образов. В других понятиях это можно выразить как необходимость введения эквива-

⁴ Процессы, происходящие при работе мозга и описываемые в виде «мозговых волн».

⁵ Нейроволновой фронт — волновой фронт электрических колебаний, возбуждаемых в мозге при передаче нервного импульса.

лентности стимулов, в пределах которой не учитываются определенные изменения стимулов, включающие изменения масштаба и относительные смещения.

Прежде всего экспериментально было показано, что распознавание образов вполне может быть осуществлено с использованием голограммы, причем такое распознавание инвариантно к смещениям объекта. Распознавание, инвариантное к размерам, также может быть осуществлено с помощью определенных типов голограмм. Было показано, что размер восстанавливаемого изображения может быть сделан большим или меньшим, в зависимости от частоты монохроматического когерентного источника, используемого для восстановления волнового фронта. При аналогичной нейрональной интерпретации процесса восстановления изображения можно допустить наличие изменений в частоте когерентной генерации нейронов, участвующих в «высвечивании» «следов» в памяти. Проблема нейронального распознавания образов имеет по крайней мере два аспекта:

- 1) уровень, на котором имеет место распознавание;
- 2) уровень, на котором происходит запоминание информации.

По первому пункту можно сказать, что поскольку распознавание должно быть инвариантно к размерам и смещениям объекта, процесс распознавания не может быть «сугубо нейрональным» в плане рассмотренных выше слоев нейронов. Маловероятным при этом представляется наличие специфических нейронов, реагирующих только на определенные параметры входящих стимулов. Голографические же процессы, наоборот, допускают наличие такого неспецифического распознавания образов. И хотя голографический процесс не является, конечно, единственным средством для реализации подобного распознавания образов, тем не менее это единственный из известных в настоящее время физических методов, который реализует это распознавание с помощью распределенного кодирования. Аналогичные соображения могут быть высказаны и по второму пункту.

Одно из главных затруднений при понимании этой проблемы в прошлом доставлял, пожалуй, следующий парадокс: как согласовать требование, чтобы информация запоминалась не «специфическими» нейрона-

ми, а каким-либо другим, например эквипотенциальным, образом, что предусматривает наличие «эквивалентности стимулов», с требованием, чтобы подобное запоминание все же приводило к образованию определенных «следов» в нейронах.

Голография и является процессом, который удовлетворяет этим требованиям. В плане указанного парадокса следует отметить, что информация об амплитуде и фазе каждой точки видимой поверхности объекта запоминается в виде соответствующих записей в каждой точке поверхности голограммы. Главной отличительной чертой этого процесса является то, что хотя информация о каждой точке объекта хранится на всей поверхности голограммы, это все же допускает восстановление изображения исходного объекта.

Процесс распознавания образов имеет много общего со свойствами ассоциативности памяти. Это справедливо как для оптической голограммы, так и для биологической памяти. С помощью голографических процессов объясняются различные свойства ассоциативности памяти, что можно показать на следующем примере.

Воспоминание А в ассоциации с воспоминанием В вырабатывает комбинированный след. В такой билатеральной ассоциации всякий раз, когда этот комбинированный след возбуждается импульсом в форме воспоминания А или воспоминания В, реакции представляются в виде воспоминания В или воспоминания А (другими словами, в виде двойника в образуемой ассоциации).

В оптических голограммах имеются по крайней мере три различных явления, представляющие точную аналогию указанной ассоциативности. Эти явления таковы:

а) При определенных условиях два отдельных монохроматических, когерентных по фазе источника А и В могут быть скомбинированы в одну голограмму, которая может затем быть использована для восстановления любой из первоначальных картин, если голограмму освещать светом от другого источника.

б) Если использовать те же интерференционные методы, что и в методе «а», можно заставить интерферировать друг с другом световые пучки от различных частей объекта. При определенных условиях

полное изображение исходного объекта может, быть получено путем освещения голограммы пучком, являющимся частью исходного потока от объекта.

в) На одну и ту же голограмму могут быть наложены два или несколько изображений, которые могли быть сформулированы либо одновременно, либо друг за другом, как при фотографическом наложении кадров. В последнем случае восстановленные изображения могут быть разделены с использованием их различного пространственного расположения или путем изменения положения опорного источника. Следует указать также на то, что имеются, по-видимому, данные, указывающие на распределенный характер самой «ассоциативности памяти» (в отличие от основных следов памяти, рассматриваемых изолированно).

Наряду со свойствами инвариантного к размерам и смещениям распознавания образов и отмеченными тремя особенностями ассоциативности памяти, к числу голографических свойств, представляющих интерес для нейрофизиологии, относятся также свойства передачи объемности, цвета и движения исходного объекта. В оптическом случае была показана возможность такого двумерного представления объекта, которая допускает дальнейшее восстановление объемного изображения объекта; были проведены также работы по восстановлению цветных изображений объекта и передаче движения объекта.

Большая часть аргументов в пользу нейроголографии опирается на анализ общих характеристик, описывающих два вида голографических процессов.

В пользу нейроголографической гипотезы говорят следующие аргументы:

а) Поскольку голография является единственным известным процессом для записи как амплитуды, так и фазы распространяющегося волнового фронта, она может стать основным инструментом при исследовании нейроволновых процессов, допускающих тот или иной вид амплитудно-фазового представления.

б) Голография является единственным известным в настоящее время физически реализуемым методом, использующим распределенное кодирование. Можно сказать, что такая распределенность в каком-то смысле удовлетворяет законам Лэшли [19].

в) Хотя инвариантное к размерам и смещениям

распознавание образов типа «а» ассоциативности памяти, объемность, цвет и движение объекта могут быть переданы различными способами, голография является единственным известным методом, в котором для этого используются распределенные характеристики.

г) Голография является единственным известным методом для выработки ассоциативности типа «б» (см. стр. 49) простым путем и с использованием соответствующей распределенности. Ассоциативность типа «б» есть весьма общий тип ассоциативности, где в базе ассоциации учитывается только одновременность воспринимаемых событий.

Одно из самых ранних подтверждений, говорящих в пользу нейроголографической гипотезы, было высказано на основе экспериментов с удалением мозгового вещества. Имеются эксперименты, свидетельствующие о сохранении зрительных ощущений у человека, несмотря на значительные разрушения в середине зоны. Имеются также нейтроанатомические свидетельства о диффузной нейрональной связности, которые могут быть привлечены для нейроголографического объяснения таких явлений, как полиопия, когда человеку кажется, что наблюдаемый им предмет распался на много смещенных друг относительно друга тождественных изображений исходного объекта. Это явление можно объяснить с точки зрения голографической гипотезы, если допустить наличие нескольких восстанавливающих источников.

Некоторые аналогии голографических и нейрофизиологических процессов

В процессе голографирования «разбрасывание» информации по всей голограмме осуществляется обычно путем освещения объекта через рассеиватель, каковым может служить матовая стеклянная пластинка. Вид такой «диффузной» голограммы весьма необычен: она выглядит как картина шума. Такую голограмму можно назвать идеальным кодом Шеннона [3]. В своей книге «Теория связи» Клод Шеннон⁶ определил, что

⁶ Американский ученый, один из «отцов» кибернетики. По выражению академика А. Н. Колмогорова, «создал основы теории информации» (в предисловии к книге К. Шеннон «Работы по теории информации и кибернетике». Пер. с англ. М., ИИЛ, 1963).

наиболее эффективным является кодирование, создающее впечатление исчезновения всех регулярностей сигнала, т. е. кодирование должно быть шумоподобным. Но где же содержится информация в этом хаосе? Можно показать, что этот хаос не настолько нерегулярен, как представляется на первый взгляд, и совсем непохож на песчинки, случайно разбросанные на пластинке. Дифракционная картина объекта, имеющая довольно сложную форму, повторяется через случайные интервалы, но всегда в одном и том же виде и в одной и той же ориентации. В ходе развития голографии наблюдалась интересная особенность: чем меньше голограмма становилась похожей на объект, тем более, совершенным получалось восстановленное изображение.

Еще более интенсивным и важным свойством диффузной голограммы является то, что любой небольшой фрагмент голограммы (достаточно большой, чтобы охватить дифракционную картину) содержит информацию обо всем объекте. Поэтому изображение объекта можно восстановить по фрагменту голограммы, правда с более интенсивным шумом. Таким образом, диффузная голограмма представляет собой элемент распределенной памяти. Данное обстоятельство вызвало догадки и вопросы о том, не является ли память мозга человека по своей природе голографической, поскольку хорошо известно, что значительная часть мозга может быть разрушена без «стирания» памяти. Следует указать, что аналогия между памятью человека и голограммой является чисто функциональной, но, конечно, не структурной.

Удивительное свойство голограммы, которое всегда отмечают, состоит в том, что каждый ее участок содержит информацию обо всем предмете. Голограмму можно разбить или разрезать на множество кусочков, и каждый из них будет давать изображение. В этом смысле голограмму следует сравнивать не с фотографией, а с зеркалом. Половина фотографии содержит изображение лишь половины всей сцены; половинка зеркала отражает предмет как обычное целое зеркало. Правда, чем меньше кусочек голограммы мы возьмем, тем хуже будет качество изображения. Края голограммы ограничат сечение пучка света, которым освещается голограмма, и нарушат тем самым монохрома-

тичность пучка по отношению к направлениям. Пучок будет расходиться и не будет эквивалентен тому опорному пучку, в котором была изготовлена голограмма.

Интересно проследить и дальше аналогию между памятью голограммы и человеческого мозга. Действительно, когда мы стараемся запомнить какую-нибудь картину, то при малом времени наблюдения мы не фиксируем отдельных деталей. Лишь при достаточно длительном наблюдении оказывается возможным через определенное время вспомнить изображения с достаточно высоким разрешением.

Очень интересен процесс запоминания образов и последующего опознавания их. Например, мы легко и быстро запоминаем похожих друг на друга людей и вместе с тем нам требуется много времени, чтобы опознать двух малоизвестных нам животных, даже если они имеют более сильные отличия. Часто мы вспоминаем или даже видим какую-либо деталь и по ней воссоздаем образ в целом. Такая операция, как мы видим, также легко осуществляется с помощью голограмм.

На основе этих примеров (список их можно легко продолжить), естественно, нельзя преждевременно утверждать, что память человека построена на принципах голографии — такой вывод мог бы быть результатом лишь очень глубоких нейрокибернетических исследований. Тем не менее кажется, что голографические принципы записи и воспроизведения информации могут оказаться полезными для понимания процессов функционирования человеческой памяти. Это лишний раз убеждает в том, что будущее голографии может оказаться еще более интересным, чем это представляется на сегодняшний день.

Глава 4 От скальпеля к световому перу



Что такое когерентность?

Долго инженеры-связисты мечтали о приборе, который по эффективности и совершенству генерации световых волн мог бы сравниться с генераторами радиоволн. Невозможно представить себе более разные по чистоте вещи, чем электромагнитные волны, испускаемые обычной лампой накаливания, и волны радиопередатчика. Действительно, радиоволны стиснуты в настолько узкой полосе электромагнитного спектра и настолько чисты от шумов, что могут служить для передачи информации. Все обычные источники света, в сущности, генераторы шумов, не пригодные в этом смысле ни для чего, кроме самой грубой сигнализации. Только с проявлением оптического квантового генератора — лазера появилась возможность точно управлять испусканием световых волн.

Исторически сложилось так, что впервые был изобретен мазер-квантовый генератор, излучающий электромагнитные волны радиодиапазона. Слово «мазер» представляет собой начальные буквы английских слов «Microwawe Amplification by Stimulated Emission of

Radiotion», что в переводе означает: «усиление микроволны при помощи вынужденного излучения». Затем был создан квантовый генератор, излучающий электромагнитные волны светового диапазона. Его по аналогии называли «лазер» («Light» по-английски означает «свет»). По существу, лазер явился материальным воплощением легендарного «гиперболоида инженера Гарина», рожденного замечательной фантазией писателя Алексея Толстого.

В нашей стране выдающихся успехов в разработке квантовых генераторов добились сотрудники Физического института Академии наук СССР (ФИАН) имени П. Н. Лебедева, ныне академики Н. Г. Басов и А. Н. Прохоров. В 1954 г. они впервые в мире создали так называемый молекулярный генератор, работающий на аммиаке. За фундаментальные исследования в области квантовой радиофизики и создание первых образцов квантовых генераторов Н. Г. Басов и А. М. Прохоров в 1959 г. были удостоены Ленинской премии. В 1964 г. им же была присуждена Нобелевская премия по физике.

Лазеры дают узконаправленные лучи света громадной интенсивности. Эти лучи значительно более монохроматичны, чем лучи других источников света. Как источники единственной частоты, лазеры уже соперничают с самыми совершенными генераторами радиоволн. Развитие лазеров идет так быстро, что в скором времени они непременно найдут самое широкое применение — от космической связи и радаров до ускорения специфических реакций в химической технологии.

Чтобы ощутить недостатки световых волн обычной природы, рассмотрим, как они получаются. Все источники света: лампы накаливания, дуговые лампы и так далее — по сути своей раскаленное вещество. Правда, в хорошо известной неоновой трубке стеклянные стенки остаются холодными, но электроны и атомы газа внутри трубки ускоряются до высоких скоростей, обычно связанных с высокими температурами. Атомы непрерывно «накачиваются» в возбужденное состояние, потом они «падают» обратно, теряя энергию и излучая видимый свет. Однако возвращаются они не все разом, а по очереди. Хаотическому движению атомов, которое мы связываем с нагретыми га-

зами, соответствует хаотическое испускание световых квантов, или фотонов. Какие именно атомы излучают в каждый данный момент — совершенно случайный процесс. Возбужденные электроны в раскаленной вольфрамовой нити лампы накаливания также излучают случайно и независимо.

Поэтому свет, полученный от любого обычного источника света, называется пространственно некогерентным. Это значит, что свет создается в виде перепутанных слабых отдельных волн, которые усиливают или гасят друг друга случайным образом. Волновой фронт, полученный таким образом, меняется от точки к точке и от одного момента времени к другому. Он напоминает волновой фронт, создаваемый в луже горстью брошенных туда камешков. С другой стороны, если в лужу бросить только один камешек, то создается когерентный круговой волновой фронт. Продолжая наши сравнения, можно представить себе точечный источник света, который может генерировать когерентные волны с фронтами, образующими сферические поверхности. В свою очередь, подходящий источник мог бы генерировать когерентные световые волны с плоскими волновыми фронтами, во всех точках плоскости которых напряженность электрического поля была бы одинаковой. По мере прохождения волновых фронтов через выделенную точку пространства можно было бы видеть плавное и ритмичное по фазе изменение напряженности электрического поля, колеблющейся между положительными и отрицательными значениями.

Если к обычному генератору радиоволн подключить небольшой излучатель подходящей конструкции, то излучатель будет испускать сферические когерентные волны. При желании к генератору может быть подключен целый набор излучающих антенн, которые будут испускать направленную волну, во многом похожую на плоскую.

Для того чтобы получить направленную волну от некогерентного источника света, необходимо взять источник малых размеров. Затем, поместив экран с отверстием на некотором расстоянии от источника, можно выделить сегмент волны, идущий в нужном направлении. В другом способе свет, испускаемый небольшим источником света, можно сфокусировать боль-

шим зеркалом или линзой, создав луч с почти параллельными образующими. Образующие луча, созданного дуговой лампой и почти двухметровым зеркалом, отклоняются от параллельности примерно на один градус. Как мы увидим позднее, излучение оптического мазера и более узко направленно, и более когерентно.

Возможно, наиболее важным недостатком обычных источников света является присущая им небольшая яркость. Как бы ни была высока их температура, они не могут излучать больше энергии, чем совершенный излучатель при такой же температуре. Теоретический выход совершенного излучателя, называемого черным телом, дается знаменитой кривой излучения черного тела, впервые найденной Максом Планком. Например, видимая поверхность Солнца ведет себя в значительной степени аналогично черному телу с температурой 6000° Цельсия. Полное солнечное излучение на всех длинах волн равно 7 кВт на квадратный сантиметр его поверхности, и как бы мы ни собирали и ни концентрировали солнечный свет, невозможно достигнуть большей плотности излучения.

Хотя 7 кВт могут показаться значительной величиной, но в действительности это не так, если принять во внимание громадную ширину солнечного спектра. Для того чтобы пояснить эту точку зрения наглядными примерами, сравним ширину видимой части электромагнитного спектра с шириной стандартного телевизионного канала, равной примерно 4 МГц [27]. После небольших вычислений видно, что область видимого спектра, расположенная между длинами волн от 4000 до 7000 Å, может вместить в себя 80 млн. телевизионных каналов. Другими словами, каждый ангстрем соответствует интервалу частот около 100 000 МГц. Если бы было возможно отфильтровать узкую линию зеленого света шириной в один мегагерц из области, где солнечный свет имеет пик излучения (4800 Å), мы бы тогда обнаружили, что каждый квадратный сантиметр солнечной поверхности испускает только 0,00001 Вт. Чтобы получить один ватт зеленого света в интервале частот в один мегагерц, необходимо собрать и отфильтровать излучение примерно с 10 м² солнечной поверхности. А созданные человеком передатчики, работающие в телевизионной области радио-

спектра, могут легко генерировать 10 000 Вт в полосу шириной много меньшей, чем 1 МГц.

Обычные источники света подобны Солнцу: они являются широкополосными генераторами шума, размазывая свое излучение по широкому интервалу частот, и на любой данной частоте концентрируется небольшая мощность. Даже газоразрядные лампы, излучающие свет с ограниченным числом узких линий спектра, уступают генераторам радиоволн по мощности, генерируемой на одной частоте.

Были приложены значительные усилия, чтобы использовать генераторы радиоволн для получения более коротких волн; длина самой короткой волны, которая может генерироваться средствами обычной радиотехники, примерно 1 миллиметр или 10 миллионов ангстрем. Любая попытка получить таким путем более короткие волны сталкивается с огромными трудностями. В первую очередь — это трудность в изготовлении резонатора, который настраивает генератор. Эти резонаторы редко могут значительно превышать длину волн. При миллиметровой длине волн они уже настолько малы, что их трудно изготовлять с одинаковой точностью. Для создания волн оптических длин, величина которых на три порядка меньше, нужен совершенно другой подход.

Привлекательное решение проблемы заключалось в отказе от попыток создать такие крошечные резонаторы и замене их атомными или молекулярными резонаторами. Природа снабдила нас большим числом таких резонаторов во всех областях спектра — инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой. Действительно, инженеры привыкли использовать атомные колебания в газоразрядных лампах. Однако единичный атом излучает очень мало энергии, да и то с интервалами. Что было бы нужно — так это какой-то способ синхронизировать большое число атомов таким образом, чтобы они могли работать вместе, создавая мощную когерентную волну.

Такой способ и был создан на основе принципа мазера. Первый мазер, созданный в 1954 г., использовал колебания молекул аммиака для получения микроволновых колебаний точно определенной частоты. Был указан практический способ изготовления так называемого трехуровневого твердотельного лазера для ис-

пользования его в качестве низкофонного усилителя микроволн. Впоследствии были созданы многие другие типы мазеров. Радиоастрономы нашли их очень удобными для усиления слабых радиосигналов из космоса. В последние годы мазеры использовались и для усиления слабых сигналов, отраженных от спутника «Эхо» [27].

Как работает лазер?

Процесс вынужденного излучения, лежащий в основе действия как мазера, так и лазера, является обратным процессу, в котором электромагнитные волны, или фотоны, поглощаются атомными системами. Когда фотон поглощается атомом, энергия фотона превращается во внутреннюю энергию атома. В результате атом переходит в возбужденное квантовое состояние. Позднее он может излучать эту энергию спонтанно, испустив фотон и вернувшись в основное как в какое-либо промежуточное состояние. Когда атом все еще возбужден, его можно вынудить испустить фотон, если с ним столкнется внешний фотон, имеющий энергию, равную энергии возбуждения. Число фотонов увеличится на фотон, испускаемый предварительно возбужденным атомом. Еще более важно и замечательно то, что эта волна испускается в фазе с волной, которая запустила ее. Это явление лежит в основе принципа лазера.

Проблема создания лазера заключается в приготовлении активной среды, в которой большинство атомов может быть переведено в возбужденное состояние. Тогда электромагнитная волна нужной частоты, проходя через нее, будет вызывать ливень фотонов. Для того чтобы вынужденное излучение превышало поглощение, необходим избыток возбужденных атомов. Атомы переводятся в возбужденное состояние с помощью инжекции в систему электромагнитной энергии на длинах волн, отличающихся от длины волны вынужденного излучения; активационный процесс называется накачкой.

Приготовленную активную среду необходимо поместить в полость-резонатор. Тогда волна, возникающая на одной из стенок резонатора, будет увеличива-

ться по амплитуде до тех пор, пока не достигнет другой стенки, где она отразится обратно в массу возбужденных атомов. На стенках неизбежно существуют потери из-за неидеальности отражения. Если усиление вынужденного излучения достаточно велико, чтобы превысить потери при отражении, то в боксе будет усиливаться стоячая волна. Для сантиметровых волн нетрудно создать бокс, имеющий размеры длины волны и сконструированный таким образом, чтобы устанавливалась волна только одной частоты колебаний. Единственной частоте колебаний соответствует единственная частота выходящего излучения. Добавочные частоты создают гармоники, или шумы, и конкурируют с нужной частотой в распределении энергии, выделяющейся из массы возбужденных атомов.

Для оптических длин волн размеры монохроматического резонатора должны быть неприемлемо малы. Чтобы преодолеть эту трудность, в 1958 г. был предложен резонатор специального типа для создания квантового генератора на оптических длинах волн. Размеры такого резонатора в тысячи раз больше, чем длина волны излучения, но тем не менее он выделяет одну частоту колебаний. В лазере резонаторный бокс заменялся установкой с двумя маленькими зеркалами, расположенными друг против друга. Волна, которая возникает вблизи одного зеркала и распространяется вдоль оси системы, будет расти за счет вынужденного излучения до тех пор, пока не достигнет другого зеркала. Здесь оно отразится обратно в активную среду и будет продолжать расти. Если увеличение интенсивности в последующих проходах достаточно для того, чтобы превысить потери в зеркалах, то установится стоячая волна. Если одно из зеркал полупрозрачно, то часть волны может испускаться через него, образуя излучение мазера.

Очевидно, что волна, распространяющаяся под углом к оси, покинет систему уже после нескольких отражений или, может быть, даже без попадания хотя бы на одно из зеркал. Такая волна не имеет той вероятности усилиться, какой обладает волна, движущаяся вдоль оси системы. Подобно другим мазерным вибраторам, оптический мазер, запускается первыми спонтанно испущенными фотонами после того, как система «накачана» в активное состояние. (С другой

стороны, лазер, сконструированный для работы в роли усилителя, использует входной сигнал как вынуждающую волну.) Можно ожидать, что излучение идеального лазера, сконструированного таким образом, будет остронаправленным, очень мощным, существенно монохроматичным и, самое главное, когерентным. Излучение должно быть остронаправленным по той причине, что только те испущенные волны могут проходить много раз — может быть, тысячи — через активную среду, которые не отклоняются слишком далеко от оси лазера. Оно должно быть очень мощным, потому что вынужденное излучение заставляет возбужденные атомы излучать значительно раньше, чем они сделали это спонтанно. Оно должно быть очень монохроматичным, потому что вынужденное излучение является резонансным процессом и происходит наиболее сильно в центре полосы частот, которые могут испускаться при спонтанном излучении. В свою очередь, эти избранные частоты будут вызывать излучение той же самой частоты, так что волна, установившаяся в лазере, будет содержать только чрезвычайно узкую полосу частот, или длин волн.

Наконец, излучение лазера, если оно представляет хорошую аппроксимацию плоской волны, движущейся в одном направлении, будет пространственно когерентным в силу того, что все волновые фронты являются плоскостями, перпендикулярными направлению распространения. Так как лазерное излучение весьма монохроматично, оно когерентно и во времени. Это значит, что существует определенная неизменная разность фаз между волной, испущенной в какой-то момент времени, и волной, испущенной несколько позже. Для волны, чей период равен одной секунде, гребни следуют один за другим через интервал в одну секунду. С другой стороны, если частота изменяется, то интервал между гребнями неравномерный. Чем ближе волна к одной фиксированной частоте, тем она более когерентна во времени.

Для проверки этих предположений требовалось приготовить активную среду, которая действительно могла бы обнаружить мазерный эффект в оптической области спектра. Первое сообщение об успехе было сделано в июле 1960 г. при использовании в установке рубинового кристалла [27]. Между июлем и кон-

цом 1960 г. еще четыре вещества были успешно применены несколькими учеными. Все эти приборы осуществляют на практике идею отражающих граничных зеркал, описанную выше. Получены оптические лазерные генераторы на различных 11 длинах волн. Вероятно, что этот набор волн значительно пополнится.

Рубиновая молния

Рубиновый лазер — типичный пример мазера на кристаллах. Рубин — это окись алюминия, в которой некоторое число атомов алюминия заменено атомами хрома; чем больше хрома, тем глубже цвет. Цвет кристалла объясняется тем, что атомы хрома в кристалле поглощают широкую полосу зеленого и желтого света вместе с ультрафиолетовым и пропускают только красный и голубой свет. Более того, поглощаемый свет переводит атомы хрома в возбужденное состояние. Из него возможно двухступенчатое возвращение в основное состояние. На первой ступени возбужденные атомы хрома передают некоторую часть своей энергии кристаллической решетке и опускаются в так называемое метастабильное состояние. Если атомы хрома не вынуждать к излучению, то они остаются на этом уровне в течение нескольких миллисекунд, переходя случайным образом в основное состояние. Фотоны, испущенные во время этого последнего перехода, имеют при комнатной температуре длину волны в 6943 Å, которая соответствует характерной красной флюоресценции кристалла рубина. Однако в лазерах несколько первых фотонов, высвобожденных с этой длиной волны, вынуждают уже возбужденные атомы хрома испускать фотоны и переходить в основное состояние значительно быстрее, чем это было бы при спонтанном переходе. Тогда возникает ливень фотонов с одинаковой длиной волны 6943 Å. Сначала был использован бледно-розовый кристалл рубина, содержащий 0,05 % хрома [27].

Для использования в лазере розовый рубин подвергается механической обработке и превращается в стержень длиной около четырех сантиметров и диаметром в полсантиметра. Его торцы с помощью полировки делаются оптически плоскими и параллельными и частично серебрятся. Стержень помещается вблизи им-

пульсной электронной трубки, дающей широкополосный накачивающий спектр. Ученые обнаружили, что наиболее сильные из этих ламп, соединенные с мощными источниками питания, могут перевести большинство атомов хрома в возбужденное состояние. До определенного критического уровня накачки ничего не происходит, кроме испускания рубином размытого импульса, типичного для флюоресцентного света. Испускание длится в течение времени, обычного для распада возбужденных атомов. Но за критическим уровнем начинается действие лазерного эффекта — интенсивный импульс красного света длительностью примерно в полмиллисекунды испускается из частично посеребренных торцов. Он указывает на то, что достаточный избыток атомов был накачан в возбужденное состояние, чтобы превысить потери на торцах.

В 1959 г. было высказано [27] предположение, что можно создать лазер, использующий темно-красный рубин, содержащий в 10 раз больше хрома, чем розовый. Предполагалось, что при такой высокой концентрации будет иметь место лазерный эффект одновременно для двух различных длин волн. В другом типе твердых лазеров использовались ионы самария и урана в кристаллах флюорида кальция.

Все эти лазеры сначала работали в режиме генерации коротких импульсов, но, по-видимому, они могут работать и в непрерывном режиме. Активная среда, использованная в них, менее пригодна для этой цели, чем другие среды, в которых вынужденное излучение происходит при переходах на промежуточный энергетический уровень, расположенный несколько выше основного состояния. Поэтому нет необходимости тратить энергию, выкачивая половину атомов из основного состояния, для того чтобы излучение могло превышать поглощение. В новых материалах промежуточное состояние, в которое атомы переходят после излучения фотонов требуемой частоты, можно освободить при помощи простого охлаждения. Тогда активная среда содержит очень немного атомов, настроенных на поглощение фотонов, созданных при действии лазерного эффекта. Для запуска необходима только достаточная накачка лазера.

Совершенно другой способ получения возбужденных атомов для лазера используется в электрической

газоразрядной трубке. В гелий-неоновой (He-Ne) газовой смеси можно добиться лазерных колебаний на нескольких длинах волн в инфракрасной области. Это устройство было предложено в 1959 г. Основная черта этого лазера — возможность непрерывной работы при очень малом потреблении энергии.

В этом лазере вынужденное излучение происходит при переходах атомов неона между двумя промежуточными уровнями, самый нижний из которых расположен достаточно высоко над основным состоянием. Для создания газового разряда требуется энергии, по существу, столько же, сколько и в обычной неоновой трубке. Кроме того, это обеспечивает перевод атомов неона на определенный уровень возбуждения, нужный для создания непрерывного лазерного луча. Так же как и в рубиновых лазерах, луч усиливается и делается когерентным при многократном отражении между плоскими торцами.

Семейство лазеров

Гелий-неоновый лазер является примером увеличившейся хитроумности лазерных конструкций. Энергия, необходимая для перевода атомов неона в возбужденное состояние, не передается непосредственно внешним фотоном; она передается при столкновении с возбужденным атомом гелия. Множество других возможностей еще остается исследовать. Энергетические уровни, пригодные для лазеров, могут быть найдены во многих различных типах систем. Например, в инфракрасной области спектральные линии создаются колебаниями газовых молекул, кристаллов и электрическим возбуждением определенных атомов в кристаллах. Какой из этих способов лучше использовать в лазере, можно будет выяснить лишь после детального изучения спектров систем.

В настоящее время, когда уже созданы лазеры, можно сравнить ожидавшиеся параметры испускаемого луча с реально полученными. К этим параметрам относятся мощность, направленность, когерентность и ширина полосы частот. Наибольшее количество информации накоплено о розовом рубиновом лазере. Образующие луча отклоняются от параллельности менее чем на полградуса. При меньшей мощности расхождение

луча уменьшается. Такая расходимость соответствует размазыванию луча только около метра на километр, и оно может быть уменьшено при пропускании луча через телескоп в обратном направлении. Используя телескопическое уменьшение расхождения, можно спроектировать на Луну пятно света диаметром лишь в 3,2 км [27].

При желании мощность лазера может быть сконцентрирована для создания интенсивного нагрева. Например, линза с фокусным расстоянием в один сантиметр будет фокусировать луч в пятно диаметром только в сотую часть сантиметра. В этом пятне лазерный луч будет выделять мощность с огромной плотностью. Хотя вспышка и коротка, но ее мощность в тысячи раз больше, чем могла бы быть получена при фокусировании солнечного света, и достаточна для плавления или испарения поверхности даже наиболее огнеупорного вещества.

Рубиновый лазер не обладает в некоторых отношениях идеальными свойствами. В частности, это относится к ширине генерируемой полосы частот. Генерируя мощные импульсы, рубиновый стержень заметно нагревается. При этом, когда достигнут лазерный порог, полоса частот сужается. Она имеет такую же ширину, как и самая узкая линия от любого нелазерного источника [27].

Рубиновый лазер по монохроматичности остается далеко позади газового лазера. Возможно частота лазерного излучения будет дрейфовать во времени, но в течение короткого периода времени она обладает замечательной стабильностью. В области радиочастот эта стабильность сравнима лишь с лучшими стандартами частоты и атомными часами.

Из всех свойств лазера ни одно не является более удивительным, чем пространственная когерентность его света. Это легко продемонстрировать, используя лазер в классическом эксперименте Томаса Юнга по интерференции света на двух щелях.

Обычно в эксперименте источник света помещается на таком расстоянии от щелей, чтобы волновые фронты достигали их, двигаясь почти перпендикулярно плоскости щелей. Если источник света большой или расположен близко к щелям, интерференционная картина смазывается. Поэтому эксперимент Юнга явля-

ется хорошей проверкой перпендикулярности волновых фронтов и когерентности волн.

Когда проводится эксперимент с лазером, щели могут располагаться непосредственно на поверхности, из которой испускается луч. В результате появляется четкая интерференционная картина. Она хорошо согласуется с картиной, вычисленной в предположении полной когерентности в области с размерами, равными расстоянию между щелями. Фактически в рубиновом стержне область когерентности обычно ограничена кристаллическими дефектами и составляет примерно одну десятую диаметра стержня. В газовом же лазере область когерентности становится равной всей площади торца.

Лазер настолько новый источник света, что приходится напрягать воображение, чтобы представить его все новые возможные применения.

Рисует световой луч

Конечно, передача сигнала является одним из самых очевидных способов использования, и ему уделяется наибольшее внимание в технике. Передача сигнала светом, хотя она используется людьми с древних времен, была ограничена в своих возможностях из-за слабости и большого фона доступных источников света. Тем самым сильно ограничивался объем информации, которую мог нести сигнал. Обычный световой луч можно сравнить с чистой, гладкой несущей волной, которая уже модулирована шумом коротких импульсов света, случайно испущенного отдельными атомами источника. С другой стороны, лазер может давать почти идеально гладкую волну, свободную от каких бы то ни было модуляций, несущую только то, что в нее хотят заложить.

Если будут найдены удобные методы модуляции, когерентные световые волны смогут переносить огромный объем информации. Дело в том, что частота света настолько велика, что ширина даже узкой полосы видимого спектра содержит в себе огромное количество колебаний в МГц. Объем информации, который может быть передан, прямо пропорционален числу таких колебаний, т. е. ширине полосы частот. Здесь необходи-

мо различать ширину спектральной линии немодулированного лазерного луча, или несущей волны, и ширину полосы после записи на нее сигнала. В телевизионной передаче несущая волна (тоже узкая) передает сигнал, создающий эффективную ширину полосы в 4 МГц. Один лазерный луч, по разумным оценкам, может нести сигнал с частотой, или шириной полосы, 100 000 МГц при условии, что найден способ генерировать такой сигнал. Сигнал такой частоты может нести столько же информации, сколько все каналы радиосвязи, существующие в настоящее время. Необходимо признать, что световой луч не сможет достаточно хорошо проходить через туман, дождь или снег. Поэтому было бы полезно в системах наземной связи световые лучи помещать в световоды [27].

Конечно, будут найдены другие способы использования лазеров. Очень горячий зайчик в фокусе луча лазера может использоваться для производства электронных приборов всех типов. Например, можно будет сваривать мельчайшие детали, находящиеся внутри стеклянного баллона. В дополнение к высокой мощности лазер является интенсивным источником когерентного излучения с очень высокой напряженностью электрического поля. В таких сильных полях атомы или молекулы могут вступать в странные и непредсказуемые реакции. Поэтому лучи могут быть полезны во многих областях научных исследований. Можно представить использование лазерных лучей в генераторах гармоник, или смесителях. В подходящий смеситель можно ввести две световые волны различной частоты и получить из него третью волну с частотой, равной разности первичных. Этим путем можно было бы синтезировать длины волн, которые не могут быть получены непосредственно. При известных обстоятельствах это должно привести к созданию супергетеродинных приемников, которые могут превращать оптические длины волн в любую более длинную волну нужной частоты.

Сравнительно недавно стало известно [27], что, если имеется достаточно мощный источник инфракрасного излучения нужной частоты, можно возбудить колебания в особом виде молекул. Любые другие молекулы, которые могут оказаться вместе с ними, не будут возбуждаться. Из-за того, что возбужденные молекулы

будут реагировать более энергично, чем другие, можно осуществлять очень тонкое управление некоторыми видами химических реакций. До настоящего времени все применявшиеся источники света были слишком слабы, чтобы такие возможности серьезно рассматривались, но лазеры при известных обстоятельствах могут сделать такое управление реальностью.

Необходимо понять, что мы говорим о целом семействе приборов, охватывающих широкий интервал частот и мощностей. Семейство будет включать в себя не только генераторы, но и усилители. Один тип будет полезен для усиления светового сигнала, который оказался ослабленным при прохождении большого расстояния (либо по световодам, либо через межпланетное пространство). Другой тип усилителя сможет усиливать целое изображение (например, слабое изображение звезды), которое подается на него.

Список возможных применений лазеров может быть расширен почти до бесконечности. С появлением лазера управление светом достигло совершенно нового уровня. Однако одна из наиболее увлекательных перспектив для работающих в этой области заключается в том, что новая степень управления откроет такие возможности использования света, какие до сих пор и не снились.

Берегите глаза от ...лазера

Использование лазера для получения голограмм медико-биологических объектов сопряжено с определенными трудностями. Особо следует быть внимательным, когда объектом изучения становится сам человек и тем более его зрительный анализатор. Напомним, что глаз в целом, со всеми своими оптическими элементами, эквивалентен слою воды в 2,28 см толщиной. Граница длинноволнового светового излучения, пропускаемого этими элементами, начинается с $\lambda = 900$ мкм. Сетчатка глаза может быть уподоблена своеобразной фоточувствительной эмульсии фотографической пленки. Однако фотографический процесс здесь обратим. Спроецированное оптическими элементами глаза изображение фокусируется на сетчатку, которая воспринимает это изображение и снова восста-

навливают свою чувствительность. Квант света, дойдя до фоточувствительных клеток, взаимодействует путем фотохимической реакции с молекулой родопсина (зрительного пурпура). Образующиеся при этом импульсы возбуждения по цепи (окончания глазного нерва — нерв — зрительный центр в мозгу) создают у нас ощущение света в строго локализованном воображаемом пространстве.

Глаз — сверхвысокочувствительная оптическая система. По данным академика С. И. Вавилова, уже 8—10 фотонов достаточно для того, чтобы получить зрительное ощущение в сине-зеленой части спектра, что невозможно ни для какой фотоэмульсии. Это соответствует энергии $1,4 \cdot 10^{-8}$ эрг/см².

Теперь рассмотрим, как может взаимодействовать лазерное излучение с различными элементами оптической системы глаза. Прежде всего необходимо иметь в виду, что степень поражаемости той или иной ткани во многом зависит от того, какое действует излучение и как его поглощает эта ткань. Все лазерные системы по диапазонам излучаемого света можно грубо разделить на три вида, дающих ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное излучения.

В ультрафиолетовом диапазоне от 240 мкм до 450 мкм идет интенсивное поглощение излучения всеми белковыми структурами глаза, в том числе роговой оболочкой и хрусталиком. Поэтому одним из первых факторов поражения является разрушение молекул белка роговой оболочки и ожог слизистой оболочки (конъюнктивы). Болевые ощущения возникают не сразу, а через некоторое время. При больших плотностях энергии коагуляция белка роговицы ведет к полному необратимому ослеплению.

В видимом диапазоне излучение проходит без особых реакций через оптические среды глаза и воздействует главным образом на светочувствительные клетки сетчатки, вызывая или временное ослепление, или ожог с последующими рубцеваниями, приводящий к потере зрения в данной области зрительного пространства [23].

Ближняя и средняя область инфракрасного излучения (от 820 до 1500 мкм) очень сильно поглощается радужной оболочкой, хрусталиком и стекловидным телом. Богатая пигментом радужная оболочка

глаза сильно нагревается и за счет теплопроводности вызывает коагуляцию белка хрусталика. Поражение глаз происходит через длительный промежуток времени. Нагрев радужной оболочки вызывает раздражающее ощущение и мигательный рефлекс. При больших плотностях энергии ослепление необратимо вследствие температурного помутнения хрусталика.

Дальняя область инфракрасного излучения (1500—1640 ммкм) генерируется преимущественно лазерами на стекле или итриево-алюминиевом гранате с примесью эрбия и сильно поглощается поврежденными тканями глаза, преимущественно роговой оболочкой. Этот диапазон считается наименее опасным для глаз, так как поражения возникают поверхностные, временного характера и только при больших плотностях энергии излучения.

Описанный механизм фотохимического преобразования зрительных пигментов, естественно, создает определенную инертность зрительной реакции на период, необходимый для восстановления пигмента, прекращения состояния возбудимости зрительных нервов и т. д. Поэтому особенный интерес представляют исследования ослепления зрительного анализатора при воздействии ярких вспышек. Каждому, кто сталкивался с явлением перехода из ярко освещенного помещения в относительную темноту, известно ощущение временной потери зрения. При направленном свете блиц-лампы фоторепортеров на некоторое время ухудшается зрение, особенно если это происходит в малоосвещенном помещении. Но несмотря на большой накопленный в различных ситуациях фактический материал, механизмы ослепления изучены недостаточно, и до сих пор нет ясности в том, какие процессы происходят в самом зрительном анализаторе.

Существует несколько точек зрения на эти процессы, одна из которых заключается в так называемой дезадаптации, т. е. нарушении установившегося светового баланса падающей и трансформируемой глазом световой энергии вследствие ее переизбыточного количества. Установлено, что восстановление адаптации после воздействия кратковременных ярких световых вспышек отличается от воздействия умеренных интенсивностей и яркостей. Материал таких исследований показывает, что в глазу происходят специфические из-

менения, которые и обуславливают сравнительно длительное восстановление световой чувствительности. Многими авторами установлено, что роль фотохимических процессов и, в частности, разложение и скорость восстановления родопсина различны в зависимости от длительности и яркости засветки. Большинство исследователей сходятся на том, что основная роль в механизмах дезадаптации принадлежит самым первым звеньям световосприятия на уровне сетчатой оболочки. В дальнейшем подключаются процессы в центральной части анализатора, а именно в корковых отделах головного мозга, что вызывает нарушение световосприятия в течение 10—15 мин после вспышки.

К настоящему времени известно большое количество различных ситуаций, вызванных случайным воздействием на зрительный анализатор излучения лазера. Так, в американской литературе [23] описан случай, происшедший в одном из учебных заведений США, когда студент подвергся непосредственному попаданию луча лазера в правый глаз. Через 20 мин после облучения пострадавший был обследован врачами. У него не отмечалось никаких болей или неприятных ощущений. Только объективное обследование показало понижение остроты зрения, умеренную инъекцию (расширение кровеносных сосудов) глазного яблока и незначительный отек верхнего века. Через сутки офтальмологическое обследование показало наличие ожога сетчатки, хорошо очерченного и имеющего пигментные включения. В дальнейшем на месте ожога образовался рубец, снизивший остроту зрения пострадавшего.

Большую опасность представляет не только прямое непосредственное попадание луча лазера в глаз, но и отражение излучения от различных бликующих поверхностей. Известен несчастный случай (ФРГ) с научным сотрудником лаборатории, занимавшимся фокусировкой луча на стеклянную кювету с раствором бензола. Луч лазера прошел через кювету, отразился от бутылки, стоявшей на полке в лаборатории, и попал в глаз сотруднику. Через 19 ч развился ожог с последующим рубцеванием и понижением остроты зрения. Анализ данного несчастного случая установил, что энергия, попавшая в глаз пострадавшему, составляла от 1 до 3 мДж. Отмеченный случай показывает, что

опасно не только прямое попадание луча лазера, но и вероятность вторичных эффектов, когда повреждение глаза обуславливается отражениями в направлении, далеко от основного луча лазера.

Появление и развитие лазерных голографических устройств большой мощности, применяемых для биологических исследований, с особой остротой ставит проблему опасности рассеивания в атмосфере (в зависимости от ее агрегатного состояния) основного луча. Работы многих зарубежных исследователей в настоящее время посвящены весьма актуальной проблеме — опасности для человека и особенно для глаз источников лазерных излучений. Установлены и границы излучаемых мощностей, значения которых достаточны для получения ответного сигнала с лоцируемого объекта и в то же время не представляют опасности для человека. При этом большое значение имеет спектральная характеристика выбранного диапазона частот и соответственно сам источник лазерного излучения (рубин, неодим и т. д.).

Глава 5 На голограмме аэрозоли и вирусы



Скажи, какой твой спектр...

Еще предшественник французского математика и физика Жана Ба- тиста Фурье, швейцарский матема- тик Д. Бернулли, занимаясь изуче- нием колебаний струны, предло- жил в 1753 г. способ разложения функции в тригонометрический ряд. Эта смелая по тем временам идея вызвала горячие споры среди виднейших тогдашних математи- ков — Эйлера, Лагранжа, Далам- бера. Строгий вывод формул был дан Фурье лишь в 1823 г. Ряды, получившие имя Фурье, использо- вались в основном как математи- ческое средство и не связывались с представлениями о физической реальности. Сам Фурье пользовал- ся ими для интегрирования урав- нений теплопроводности. С тех пор разложение (по Фурье) стало обще- принятым для решения волновых уравнений математической физи- ки. Но даже спустя много лет не- которые виднейшие физики выска- зывали сомнения о соответствии разложения Фурье тем физическим процессам и явлениям, которые имеют место в реальности. Однако в начале нашего века на- чинается бурный рост отраслей техники, базирующихся на волно-

вых представлениях. Ведущее место здесь занимает электроника. Именно в это время было доказано, что спектральное разложение однозначно описывает поведение реальных колебаний.

И наконец, стала просматриваться аналогия между представлениями радиофизики и теории связи, с одной стороны, и теориями формирования оптического изображения, с другой стороны. Одно из фундаментальных понятий оптики — явление дифракции стало описываться с помощью методов гармонического анализа. В отличие от сигналов радиотехнических, представляющих функцию единственной переменной — времени, распределение амплитуд в изображениях является функцией двух, а то и трех переменных — координат на плоскости или в объеме. Соответственно и спектральное разложение для электрических сигналов представляет собой совокупность «временных» синусоидальных колебаний различных частот. Для изображений преобразование Фурье дает набор пространственных гармонических колебаний, отличающихся периодом, амплитудой и ориентацией.

Естественно, что специфичны и методы анализа систем, формирующих изображение. Чрезвычайно заманчиво было бы для описания поведения таких систем применить разработанные в теории передачи одномерных сообщений удобные и экономные методы, в частности, методы, использующие системы линейных дифференциальных уравнений. Решения этих уравнений — интегральные выражения, связывающие вход и выход устройства, достаточно полно характеризовали бы работу системы.

Оптическая система при освещении объекта, находящегося в передней фокальной плоскости объекта, параллельным пучком света осуществляет в задней фокальной плоскости операцию, описываемую двумерным преобразованием Фурье. Эта плоскость, названная немецким ученым-оптиком Эрнстом Аббе плоскостью «первичного изображения», является плоскостью двумерного спектра изображения объекта. Элементарные световые волны, вышедшие из каждой точки этой плоскости интерферируют между собой во всем пространстве, находящемся за объективом, и образуют в плоскости, сопряженной с плоскостью объекта, изображение его, названное Аббе «вторичным изображе-

нием». Таким образом, между «первичным» и «вторичным» изображением объекта существует зависимость, описываемая обратным преобразованием Фурье.

При исследовании трехмерных биологических объектов излучение создает в дальней дифракционной зоне поле, распределение амплитуд и фаз в котором связано преобразованием Фурье с распределением плотности в структуре объекта. Эти строгие количественные соотношения между структурой объекта и рассеянным им излучением навели ученых на мысль о возможности расчетного формирования изображения. Для этого используются данные о распределении амплитуд и фаз в обратном пространстве.

Круг задач такого плана довольно распространен в структурных исследованиях и получил название обратных дифракционных задач. Возникают они в тех случаях, например, когда по условиям эксперимента невозможно сформировать увеличенное изображение объекта. Так, из-за высокой проникающей способности рентгеновских лучей трудно изготовить линзы, которые могли бы обеспечить формирование в этом диапазоне изображения. Однако зарегистрировать распределение поля в дальней дифракционной зоне можно, так как для этого не требуется никакой оптики. Выполнив обратное преобразование Фурье от распределения амплитуд и фаз в обратном пространстве, можно расчетным путем восстановить изображение структуры. На этой идее основывается такое мощное направление исследований, как рентгеноструктурный анализ. Этот метод, предложенный еще в 1912 г., нашел продолжение в известных работах отца и сына Брэггов и других ученых. Фазовую проблему, которая считается одной из главных в рентгеноструктурном анализе, блестяще разрешил «отец голографии» Д. Габор.

Идея голографии, как уже отмечалось, касалась возможностей компенсации сферических аберраций в электронном микроскопе и состояла в двухступенчатом процессе регистрации изображения. На первом этапе фиксировалось распределение амплитуд и фаз дифрагированного объектом электронного излучения, а на втором — осуществлялось восстановление волнового фронта в оптическом диапазоне, где и производилась коррекция аберраций. Регистрация фаз оказалась возможной за счет интерференции рассеянного объек-

том излучения с когерентным фоном, т. е. несмотря на то, что голограмма фиксировалась на фотопластинках, регистрирующих лишь интенсивности, за счет предложенной Габором интерференции с фоном записанное распределение интенсивности все же сохраняло информацию о фазах.

Работа Габора, как уже говорилось, была почти забыта до начала 60-х годов, когда изобретение лазера дало мощный толчок развитию голографии. Поразительный эффект трехмерности при восстановлении голограмм объемных объектов, продемонстрированный с помощью лазера, был обязан высокой степени когерентности источника освещения. К сожалению, лазеры в рентгеновском диапазоне пока отсутствуют, и восстановить абсолютно точно трехмерное изображение биообъекта пока невозможно (хотя длина волны рентгеновского излучения позволила бы увидеть даже пространственное расположение отдельных атомов).

Электронное зрение

В основе работы электронного микроскопа лежит свойство неоднородных электрических и магнитных полей, обладающих вращательной симметрией, оказывать на электронные пучки фокусирующее действие. Таким образом, роль линз в электронном микроскопе играет совокупность соответствующим образом рассчитанных электрических или магнитных полей; соответствующие устройства, создающие эти поля, называют электронными линзами. В зависимости от вида электронных линз электронные микроскопы делятся на магнитные, электростатические и комбинированные.

Какого же типа объекты могут быть исследованы с помощью электронного микроскопа? Так же как и в случае оптического микроскопа, объекты, во-первых, могут быть «самосветящимися», т. е. служить источниками электронов. Это, например, накаливаемый или освещаемый фотоэлектронный катод. Во-вторых, могут быть использованы объекты, «прозрачные» для электронов, обладающих определенной скоростью. Иными словами, при работе на просвет объекты должны быть достаточно тонкими, а электроны достаточно быстрыми, чтобы они проходили сквозь объекты и поступали

в систему электронных линз. Кроме того, путем использования отраженных электронных лучей могут быть изучены поверхности массивных объектов (в основном металлов и металлизированных образцов). Такой способ наблюдения аналогичен методам отражательной оптической микроскопии.

По характеру исследования объектов электронные микроскопы разделяют на просвечивающие, отражательные, эмиссионные, растровые, теневые и зеркальные.

Наиболее распространенными являются электромагнитные микроскопы просвечивающего типа, в которых изображение создается электронами, проходящими сквозь объект наблюдения. Такой микроскоп состоит из следующих основных узлов: осветительной системы, камеры объекта, фокусирующей системы и блока регистрации конечного изображения, состоящего из фотокамеры и флюоресцирующего экрана. Все эти узлы соединены друг с другом, образуя так называемую колонну микроскопа, внутри которой поддерживается разряжение. Осветительная система обычно состоит из трехэлектродной электронной пушки (катод, фокусирующий электрод, анод) и конденсорной линзы (здесь и далее речь идет об электронных линзах). Она формирует пучок быстрых электронов нужного сечения и интенсивности и направляет его на исследуемый объект, находящийся в камере. Пучок электронов, прошедший сквозь объект, поступает в фокусирующую (проекционную) систему, состоящую из объективной линзы и одной или нескольких проекционных линз.

Объективная линза предназначена для получения увеличенного электронного изображения (обычно увеличение 100 *). Часто это увеличенное изображение называют промежуточным. Для его наблюдения в плоскости изображений объективной линзы располагают специальный экран. Этот экран, покрытый люминесцирующим веществом (люминофором), аналогичный экрану в кинескопах, превращает электронное изображение в видимое.

Часть электронов из числа попадающих на экран необходимо направлять в проекционную линзу для формирования конечного электронного изображения; с этой целью в центре экрана сделано круглое отвер-

стие. Поток электронов, прошедших сквозь отверстие, перед поступлением в проекционную линзу диафрагмируется. В более сложных микроскопах используются две электронные линзы. В этих случаях первую из линз называют промежуточной; она формирует второе промежуточное изображение. Вторая же проекционная линза формирует конечное электронное изображение, которое фиксируется в блоке регистрации. Результат электронно-микроскопического исследования может быть получен либо в виде распределения плотностей почернения фотографической пластинки, либо в виде распределения яркостей свечения люминесцентного экрана.

Образование изображения в просвечивающем электронном микроскопе связано главным образом с различной степенью рассеяния электронов различными участками исследуемого образца и в меньшей мере с различием в поглощении электронов этими участками. В зависимости от степени рассеяния электронов участками образца через так называемую апертурную диафрагму, помещенную перед объективной линзой, проходит большее или меньшее число электронов (диафрагма пропускает лишь те электроны, углы рассеяния которых не очень велики). Контрастность получаемого изображения определяется отношением числа прошедших через диафрагму электронов к общему числу электронов, рассеянных данным микроучастком образца.

Какие же объекты можно наблюдать и исследовать с помощью электронного микроскопа? Пусть его разрешающая способность составляет порядка нескольких ангстрем, т. е. порядка 10^{-10} м. Величина 10^{-10} м очень малая, если ее сравнивать с размерами тех вещей, тех объектов, которые мы можем взять руками, потрогать. Все эти предметы состоят из громадного числа атомов и молекул. Величина же 10^{-10} м сравнима с размерами отдельных атомов и молекул. Таким образом, научившись видеть и обращаться с такими величинами, мы приобретаем возможность работать с отдельными атомами и молекулами вещества или по крайней мере с объектами, в которых не очень много атомов. Современные электронные микроскопы позволяют наблюдать и изучать большие органические молекулы.

На уровне размеров, разрешаемых современной электронной микроскопией, разворачиваются события, играющие в конечном итоге исключительно важную роль в жизни человека, природе и технике.

Важность проблемы улучшения разрешающей способности в электронной микроскопии, приближения ее к теоретическому пределу, стимулировала проведение целого ряда исследований. Из многочисленных предложений и идей, зачастую остроумных и весьма перспективных, остановимся теперь более подробно на идеях, высказанных Д. Габором и получивших в последние годы широкое развитие в оптике, радиофизике, акустике, особенно в связи с созданием оптических квантовых генераторов (лазеров). Речь, конечно же, идет о голографии, о которой известно сейчас уже не только специалистам, но и всем тем, кто интересуется новейшими достижениями физики. Как это часто бывает в истории науки и техники, современные успехи голографического метода связаны с другими важными техническими задачами, хотя, по-видимому, первоначальная идея будет реализована и в электронной микроскопии.

Сущность метода Габора сводится к следующему. Монохроматический поток электронов, т. е. поток, содержащий электроны с одинаковыми скоростями, освещает объект исследования (по схеме просвечивающего или теневого микроскопа). При этом происходит дифракция электронов на объекте (вспомним волновые свойства электронов!). Обычно в электронном микроскопе пучок, претерпевший дифракцию на объекте, поступает в систему электронных линз, формирующих изображение и обеспечивающих нужное увеличение. Однако эти же линзы, как мы уже отмечали, являются источниками трудноустраняемых искажений, препятствующих достижению теоретического разрешения. В новом методе предлагалось фиксировать результат дифракции электронов фотографически в виде дифракционной картины и подвергать эту картину последующей обработке с помощью оптических методов, где получение нужных увеличений может быть достигнуто с меньшими искажениями. В таком двухступенчатом процессе получения изображений основное увеличение достигается за счет перехода от электронных длин волн к оптическим.

При этом следует отметить, что обрабатываемая оптическими методами картина дифракции практически не имеет сходства с объектом исследования. Однако с помощью светового излучения по этой картине в несложном оптическом устройстве можно восстановить изображение исследуемого объекта. Для этого источник излучения должен посылать монохроматические когерентные волны, т. е. должен обладать теми свойствами, которые так ярко проявляются у оптических квантовых генераторов.

Заметим, что в этом двухступенчатом процессе мы фиксируем, «замораживаем» фронт электронных волн и потом воспроизводим его вновь в виде фронта световой волны в значительно большем масштабе, используя при этом различие длин волн света и электронов [21].

В таком «безлинзовом», а потому и не вносящем искажений увеличении и заключается основное достоинство метода голографии в электронной микроскопии.

Живое в трех проекциях

Живой организм представляет собой клубок хитроумно сплетенных нервных путей, сосудов, петель кишечника, системы капилляров и бронхов. Мера порядка, которую человек пытается внести в это сложнейшее хозяйство, требует знания длин путей, величин поверхностей, объемов и форм.

Как правило, понятие «морфология» связывают со структурной организацией целого организма, отдельных его частей вплоть до клеточного уровня. Однако исследования последних десятилетий показали, насколько важны понятия структуры, формы на молекулярном уровне. Функциональные свойства белков определяются во многом расположением атомов молекулы в пространстве. Конфигурация, которую приобретает последовательность аминокислот, формирующая полипептидную цепь, связана с тем, что молекула стремится принять форму, при которой ее свободная энергия минимальна. Основные жизненные процессы, такие, как дыхание, движение, связаны с изменением пространственной организации отдельных компонентов белковых молекул.

Исследование структурной организации живого осложнено значительными трудностями. К решению подобных задач привлекается не только самая совершенная техника, но и математические методы и приемы, позволяющие расшифровать закодированные планы строения живого. Основная цель таких методов — преодолеть методические и аппаратные ограничения. К сожалению, в ряде случаев судить о структуре мы можем либо по неполным сведениям об отдельных ее составляющих, либо на основании излишне усредненных данных. Биологические объекты по своей природе трехмерны. Однако, как правило, исследователь имеет доступ к плоским модификациям объемной структуры. В тех случаях, когда объект непрозрачен, а интерес представляет внутренняя структура такого непрозрачного образования, широко используется метод сечения или срезов.

Этот метод наиболее распространен на клеточном уровне исследований. Структура рассекается на отдельные достаточно тонкие срезы, которые наблюдаются в оптическом микроскопе. Здесь третье измерение оказывается утраченным за счет механического нарезания структуры в направлении одной из осей. Задача восстановления третьего измерения сводится к распространению сведений, полученных от отдельных сечений, на структуру в целом. Другими словами, необходимо отыскать некоторые количественные характеристики трехмерной структуры по имеющемуся в наличии набору плоских сечений. К характеристикам, которые могут представлять интерес, относятся: величина поверхности, объем структур, их число в единице объема и, наконец, сведения о форме и ее изменениях.

Используя данные, полученные телевизионными устройствами в результате сканирования срезов, отдельные точки собираются в линии, суммирование отрезков линий приводит к площадям, суммирование площадей — к объемам. Причем всякий раз задача решается статистически, т. е. учитывается вероятность получения в сечениях фрагментов различных конфигураций в зависимости от взаимного положения (по углу и координате) секущей плоскости по отношению к структуре объекта.

При исследовании молекулярного уровня организации возможности механического нарезания структуры

оказываются ограниченными (даже наиболее совершенные ультрамикротомы дают срезы толщиной в доли микрона, в то время как интерес часто представляют детали размером в единицы ангстрем). Электронные микроскопы, с помощью которых исследуются молекулярные структуры, обладают вследствие ряда причин незначительной глубиной фокуса. В результате небольшие, но достаточно сложные объемные образования, наблюдаемые в электронном микроскопе, представляются в виде плоской проекции трехмерной структуры на плоскость. Здесь третье измерение утрачивается за счет суммирования плотности в направлении одной из осей, совпадающей с направлением электронного пучка. Можно ли в этом случае извлечь информацию о третьем измерении, реконструировать трехмерную структуру?

Оказывается, можно. Идея метода сводится к тому, что при некоторых допущениях преобразование Фурье электронно-микроскопического изображения, представляющего проекцию трехмерной микроструктуры на плоскость, эквивалентно центральному сечению трехмерного преобразования Фурье. Таким образом, переход от проекции к обратному пространству (подсчет на ЭВМ преобразования Фурье такой проекции) дает центральное сечение трехмерного обратного пространства. Выполнение обратного преобразования Фурье приводит к трехмерной структуре.

Поиски третьего, «голографического» измерения на субмикроскопическом, молекулярном уровне становятся одним из весьма важных направлений современной биологии. Ведь функциональное многообразие различных внутриклеточных соединений часто определяется трехмерными перестройками структуры, изменениями пространственного расположения друг относительно друга отдельных частей молекул. Важнейшие жизненные процессы на молекулярном уровне, связанные, например, с движением, дыханием, сопровождаются изменением пространственной организации структуры. Поэтому выяснение принципов действия «молекулярной машины» невозможно без четкого представления о местоположении и перемещениях в процессе работы отдельных ее узлов. Почти уникальную возможность увидеть отдельные молекулы и даже составные ее части предоставляет электронный микроскоп, формирую-

щий изображение структуры с помощью электронного пучка. И хотя разрешение лучших современных микроскопов достигает 2—3Å, биологические объекты пока не могут исследоваться с таким разрешением. Связано это с необходимостью контрастирования биологических объектов, которые сами слабо рассеивают и поглощают электроны, веществами сильно рассеивающими электроны.

Однако помимо ограничений, связанных с методикой приготовления биопрепаратов для наблюдения в электронном микроскопе, имеются ограничения и самого прибора. Из-за довольно сильных и принципиально неустранимых сферических аберраций величина апертуры электронного микроскопа очень мала, а глубина фокуса при этом часто превышает толщину исследуемых объектов [22]. Поэтому электронно-микроскопическое изображение всегда представляет собой проекцию трехмерной структуры на плоскость. В этом и состоит одна из основных сложностей в исследовании пространственной организации молекулярных структур с помощью электронного микроскопа. До сих пор трехмерная интерпретация электронно-микроскопических изображений является наиболее уязвимым местом анализа и во многих случаях базируется на интуиции и опыте исследователя. Часто прибегают к получению снимков структуры в различных ориентациях. Известно, что такой прием облегчает получение представления о пространственной организации объекта.

В последние годы в Советском Союзе, Англии и США появились описания различных методов точного, количественного восстановления трехмерной структуры по ее электронно-микроскопическим снимкам. Восстановление третьего измерения производится по набору проекций, полученных под разными углами.

На помощь приходит голография

Преимуществами голографической микроскопии являются большее поле зрения при высоком разрешении и большая глубина изображения. Использование голографической регистрации позволяет создавать безлинзовые микроскопы, поскольку сама голограмма

обладает свойствами оптического элемента. В таких микроскопах увеличение может быть получено за счет применения расходящихся пучков и пучков с длиной волны, отличной от длины волны, используемой при регистрации [20].

Однако дальнейшее развитие голографической микроскопии пошло по другому пути. В новом методе было использовано видоизменение обычного микроскопа, так что процесс голографирования уже не был безлинзовым.

В одной из схем [31] для получения опорного и объектного пучков применяется расщепитель пучка на дифракционной решетке. Освещающее объект излучение, так же как и излучение, дифрагированное объектом, проходит через обычный микроскоп, а опорный пучок отражается от зеркала и фокусируется в точку. Шумовые компоненты на стадии восстановления удаляются с помощью пространственного фильтра. Поле зрения в данной схеме не может превысить поля зрения при нормальном использовании микроскопа, однако в ней можно получить и разрешение, равное предельному разрешению микроскопа, и довольно большую глубину регистрируемого изображения. Глубина изображения ограничивается когерентностью опорного пучка и разрешением фотоэмульсии голограммы.

Было проанализировано изображение мира⁷ из трех штрихов, полученное по данной схеме без диффузного рассеивателя. Разрешение составляет 1 мкм, однако общее качество изображения довольно невысокое. Использование мелкозернистого рассеивателя из опалового стекла способствует удалению некоторых из наблюдаемых дефектов изображения, однако при высоких разрешениях это приводит к ряду других проблем (не считая потерь в разрешении). Причиной шумов является когерентный характер процесса формирования изображения.

К настоящему времени сделано много для решения этой проблемы, однако до сих пор не удалось получить сколько-нибудь удовлетворительного результата. Одним из решений при этом является использование апертуры, превышающей апертуру, требуемую для по-

⁷ Мира — своего рода тестовый сигнал, используемый в оптике. Позволяет оценить разрешающую способность и некоторые другие оптические характеристики прибора.

лучения заданного разрешения, одновременно с применением диффузного рассеивателя. Этот метод, однако, не эффективен, если разрешение должно составлять несколько микрон. Можно ожидать, что эффективным окажется использование чисто фазового случайного рассеивателя в контакте с объектом.

Действительно, благодаря внедрению этого метода голографический микроскоп стал реальностью. С помощью его исследовались типичное изображение нейрона и другие голограммы. Можно разглядеть тонкие волокна микронной толщины и просмотреть структуру по глубине, определяя пересечения волоконных образований.

Укажем на ряд других преимуществ голографической микроскопии, включая регистрацию по голограмме как амплитудной, так и фазовой информации. Значительный выигрыш дает голография при изучении изменяющихся со временем объектов, поскольку весь набор диагностической техники, включая теневые методы, анализ в светлом и темном полях и интерферометрию, можно использовать после завершения процесса регистрации.

Микрочастицы крупным планом

Развитие другого направления в голографической микроскопии связано со специальным применением — определением размеров движущихся частиц [10], [31]. Именно в процессе работ по применению голографии в этой области были выявлены характерные свойства фраунгоферовских голограмм. Первоначально данный метод микроскопии был использован для регистрации изображений капель воды в естественном тумане, а затем нашел применение в решении целого ряда других медико-биологических проблем.

Голографическая камера (лазерный анализатор частиц тумана) представляет собой измерительное устройство для регистрации размеров и относительного положения капель. В устройстве осуществляется метод голографии Фраунгофера. Оно содержит две основные системы — систему регистрации и систему воспроизведения.

В системе регистрации рубиновый лазер, работаю-

щий в режиме модуляции добротности, освещает исследуемый объем, экспонируя голограмму. Малая длительность лазерного импульса обеспечивает фактическую неподвижность частиц тумана и дает возможность одновременно зарегистрировать размер и относительное положение частиц в объеме с большим разрешением и большой глубиной поля зрения.

В системе воспроизведения голограмма освещается He-Ne-лазером [27], работающим в непрерывном режиме. Восстанавливаемая волна образует объемное видимое изображение порции частиц тумана, занимающих часть объема, зарегистрированную на голограмме. Наблюдение и измерение размеров и положений частиц производилось с помощью телевизионной системы со специальной оптикой.

В устройстве, на котором проверялась эффективность метода, для устранения фоновой засветки использовали пространственный фильтр, поэтому изображения имели характерный вид дисков Эйри.

Были изготовлены два лазерных анализатора частиц тумана, которые работали в полевых условиях.

По ряду причин эти лазерные анализаторы позволяли изучать частицы диаметром 30 мкм и более. Разрешение пленки и проекцирующие линзы не давали возможности зарегистрировать частицы меньшего диаметра. Затем в конструкцию анализаторов были внесены изменения, а полученные данные обработаны для измерения диаметров зарегистрированных частиц тумана.

Оптическая схема системы считывания (воспроизведения) лазерного анализатора состояла в следующем. Голограмма восстанавливается при освещении коллимированным излучением He-Ne-лазера. Лазерный свет сначала фокусируется с помощью собирающей линзы на точечную диафрагму, которая действует как фильтр нижних пространственных частот, сглаживающий мелкомасштабные изменения интенсивности в поперечном сечении пучка. Голограмма устанавливается в подвижной рамке, а восстанавливаемые действительные изображения проектируются на фотокатод видикона телевизионной системы. Размеры сфокусированных изображений капель определяются визуально с помощью сетки на экране телевизионного приемника. Телевизионная система обеспечивает воз-

возможность увеличения изображения и яркости без потери контраста.

Было изучено несколько схем измерения с полной автоматизацией процесса. Наиболее сложным этапом таких измерений являются поиск и фокусировка действительных изображений отдельных капель. В этом направлении был получен ряд положительных результатов. Автоматизацию процесса измерений для частиц меньшего размера осуществить не удалось, поскольку шумы пленки и несфокусированные изображения больших капель дают вклад в величину сигнала (интенсивность) того же порядка, что и сфокусированные изображения мелких капель. Неавтоматизированная визуальная техника позволяет определять размеры частиц диаметром до нескольких микрон.

Конструкция системы считывания была изменена так, чтобы облегчить обработку данных в полевых условиях и обеспечить оператору максимальные удобства в работе. Оптическая система остается довольно простой и допускает любые изменения в узлах будущих анализаторов, пригодных для исследования частиц с другими размерами. Механическое сканирование с электрическим приводом позволит использовать полностью автоматизированную схему.

Голографические пузырьки

Голографию можно использовать для увеличения глубины изображений в фотографиях пузырьков камер.

Ярмо магнита не позволяет проводить наблюдения прямо сквозь камеру. Необходимо наблюдать камеру с той же стороны, с которой в нее вводится излучение светового источника. Для этого была предложена схема с зеркалом на задней поверхности моделируемой камеры. При контрольных испытаниях этой схемы в камеру помещались неподвижные проволоки и инжестировались аэрозольные частицы. Высокое разрешение по диаметру частиц легко получалось в объеме глубиной, превышающей требуемую. Точность же положения частиц по глубине объема была значительно ниже и приблизительно в 20 раз превышала диаметр части-

цы. Точность определения углового положения треков достигала $\pm 4^\circ$.

Пузырьки моделировались с помощью стеклянных шариков диаметром 150 мкм, свободно падающих через ячейку, заполненную полигликолем. Показатель преломления шариков равнялся 1,52, а показатель преломления жидкости — 1,45. При реконструкции голограмм этих шариков получалось изображение с весьма хорошим разрешением. Относительная точность определения диаметров частиц составляла 3%. Точность определения положения равнялась 10—20 диаметрам частицы, что хуже точности, достигаемой в распространенном методе триангуляции, в котором используется пара фотографий пузырьковой камеры. Это ограничение для данной голографической схемы носит фундаментальный характер и зависит от эффективной апертуры схемы голографической регистрации, которая определяется диаметром голограммы, создаваемой отдельной частицей. Значение эффективной апертуры рассчитывается просто и хорошо согласуется с результатами экспериментов, упоминавшихся выше. Увеличение точности определения положений частиц потребовало бы использования пленок с более высоким разрешением, что нежелательно при регистрации изображений пузырьковой камеры.

В дальнейших экспериментальных исследованиях для подавления изображений лишних треков была применена оптическая пространственная фильтрация.

Для синтеза голограмм сферических жидких капель, освещаемых плоской волной монохроматического линейно поляризованного света, можно использовать электронно-лучевую трубку, соединенную с ЭВМ.

Определение картины дальнего поля излучения, рассеянного каплями, проводилось на основе классической теории. Наиболее ярко выраженные максимумы и минимумы в картине рассеянного излучения имеют место недалеко от переднего лепестка диаграммы рассеяния, если частица наблюдается в плоскости, перпендикулярной направлению поляризации падающей волны. Характерные максимумы и минимумы регистрировались на голограмме. При расчете в качестве источника опорного пучка был взят электрический диполь с осью поляризации, параллельной поляризации излучения, освещающего частицы.

Глава 6 Видимый звук



Акустическая «фотокамера»

Оптическая голография — способ получения трехмерных изображений с помощью лазерных лучей — породила новую форму голографии, в которой для получения первичной голограммы вместо световых используются звуковые волны. После этого для восстановления или перевода акустической голограммы в воспринимаемый зрительный образ используется лазерный луч. Другими словами, акустическая голография дает возможность создавать оптический аналог акустическому волновому полю. Так как звуковые волны могут проникать через непрозрачные предметы, начиная от живых тканей и кончая металлическими сооружениями, новый метод получения изображений имеет многообещающие перспективы применения во многих областях медицины и техники.

Оптическая голография, иногда называемая процессом восстановления волнового фронта, получила практическое применение с открытием лазера, явившегося интенсивным источником света, волны которого когерентны или находятся в фазе. Оптическая голография по-

лучается следующим образом: лазерный луч направляется на предмет, и на фотопластинке регистрируются интерференционные картины, получаемые при взаимодействии световых волн, отраженных от предмета, с частью первичного лазерного излучения, служащего в качестве опорного луча. Хотя голограмма, полученная таким образом, кажется бессмысленной путаницей, в действительности она содержит в закодированной форме всю информацию, которую получил бы глаз, если бы он находился на месте фотопластинки. Код можно расшифровать, освещая голограмму другим лазерным лучом, который восстановит прежний вид объекта.

Для получения акустической голограммы сцена, которую необходимо зарегистрировать, «освещается» вместо лазерного луча звуком чистого тона. Предметы на сцене возмущают поле звуковых волн, в результате чего возникают интерференционные картины, аналогичные картинам, получаемым с помощью световых волн. Как мы увидим ниже, в акустической голографии не всегда необходимо использовать опорный луч, и голограммы могут записываться различными способами. Будучи записана, акустическая голограмма может быть восстановлена лазерным лучом точно так же, как и оптическая.

В чем состоят преимущества использования звука вместо света? Взаимодействие звука с твердыми и жидкими телами отличается от взаимодействия с ними электромагнитного излучения. Звук может без заметных потерь энергии проходить большие расстояния в плотной однородной среде, однако он будет терять значительное количество энергии при прохождении поверхности раздела. Эта потеря связана с отражением на границе. Наоборот, электромагнитное излучение, такое, как рентгеновские лучи, теряет значительное количество энергии, проходя через среду, но на поверхности раздела потери незначительны. Поэтому только звук может быть эффективен в медицинской диагностике, при неразрушающих испытаниях, в подводной и подземной локации. Это объясняется тем, что наблюдателя интересуют в основном разрывы внутренних органов, опухоли, трещины, затонувшие объекты или подземные пласты, а не сама толща среды.

Конечно, получение изображения с помощью звука не ново; существуют приборы, называемые сонарами,

которые дают такие же картины, как и на экране радара. Этот тип приборов в настоящее время применяется при разведке нефти и полезных ископаемых. Аналогичные сканирующие методы использовались также врачами для нахождения грудных опухолей и при обследовании плода. В этих приложениях звук обычно имеет частоту от одного до десяти мегагерц. Один акустический метод использует прибор, который удачнее всего называть акустической «фотокамерой». В этом методе звуковые волны, отраженные от объекта, фокусируются акустической линзой в преобразователь изображения, который переводит конфигурацию звуковых волн в видимую картину.

Недостаток этих методов получения изображения с помощью звука — двумерность изображения. Она объясняется тем, что фиксируется только интенсивность (квадрат амплитуды) звуковых волн в звуковом изображении. При этом невозможно регистрировать фазовую информацию, т. е. время прихода гребня волны от объекта относительно гребня опорной волны той же самой частоты. В голографии вся информация может быть обратно преобразована в оптическое изображение, которое в результате окажется трехмерным.

Простейший путь для понимания принципа действия голограммы — это представление о ней, как о закодированной дифракционной решетке. Рассмотрим сначала простой точечный объект, освещаемый плоской волной от бесконечно удаленного когерентного источника. Точечный объект рассеивает часть волны, превращая ее в сферическую волну с центром в точке, где он находится. И сферическая (рассеянная) волна, и плоская (опорная) попадают на плоскость, перпендикулярную направлению распространения опорной волны. В некоторых точках плоскости опорная волна находится в фазе с рассеянной волной, так что обе эти волны интерферируют друг с другом и складываются, увеличивая амплитуду волны. В других точках рассеянная волна находится в противофазе с опорной. Эти две волны, интерферируя, вычитаются одна из другой, уменьшая амплитуду. Если мы регистрируем амплитуду (интенсивность) на плоскости как изменение плотности потемнения фотопластинки, получившаяся в результате этого картина будет представлять ряд концентрических кругов. Их центр будет находиться в

точке пересечения плоскости пластинки и линии, проходящей через источник звука и точечный объект. Эта картина очень похожа на кольца Френеля: центральный «глаз», окруженный концентрическими кольцами постоянно уменьшающейся толщины. Однако в голограмме точечного объекта плотность колец изменяется при удалении от центра по синусоидальному закону, причем частота синусоидальных волн увеличивается на периферии.

Визуализация звуковых волн

Хорошо известное свойство зонной пластинки состоит в том, что благодаря дифракции на кольцах она работает как линза. Однако она работает так, как если бы была одновременно и выпуклой и вогнутой линзой. Если описанную плоскую голограмму освещать только плоской (опорной) волной, голограмма, работая как вогнутая линза, породит расходящуюся сферическую волну, распространяющуюся от пластинки. При этом будет создаваться «мнимое» изображение точки в том положении, какое первоначально занимал точечный объект. В то же время, работая как выпуклая линза, голограмма породит сходящуюся волну, образующую действительное изображение точки.

Следовательно, волна, распространяющаяся от голограммы, имеет три компоненты. Первая компонента — ослабленная часть освещающей волны, проходящая прямо через голограмму. Она называется волной нулевого порядка. Вторая — расходящаяся сферическая волна, распространяющаяся как бы от мнимого изображения точки. Это — дифракционная волна первого порядка. Она восстанавливает первоначальную сферическую волну, испущенную точечным объектом при записи голограммы, и называется правильной восстанавливающей волной. Третья — сходящаяся сферическая волна, образующая действительное изображение точки. Она тоже является дифракционной волной первого порядка, но, имея кривизну, обратную кривизне расходящейся волны, называется сопряженной волной.

Обычно голограмма создает два изображения. Одно из них — мнимое, расположенное в том же месте, где находился освещаемый предмет. Другое — действительное, расположенное с другой стороны голограммы.

Однако при определенных условиях (при освещении голограммы сферической волной вместо плоской) оба изображения могут быть или одновременно мнимыми, или одновременно действительными. Поэтому было бы не совсем точно приписать одному из них название мнимого, другому — название действительного. Во избежание путаницы условились одно называть правильным изображением (создается правильной восстановленной волной), а другое — сопряженным (создается сопряженной волной).

Теперь посмотрим, что получается, когда голограмма освещается лучом с длиной волны короче, чем длина волны звука, использовавшегося для записи голографической зонной пластинки. При дифракции угол дифрагировавшей волны увеличивается или уменьшается, если отношение длины волны к расстоянию между кольцами соответственно увеличивается или уменьшается. Если голограмма освещается лучом с длиной волны меньшей, чем у записывающего луча, то в результате уменьшается дифракционный угол возникающих дифрагированных волновых фронтов. Правильная и сопряженная волна при этом расходятся и сходятся более медленно, и поэтому правильное и сопряженное изображения располагаются дальше от голограммы, однако эти изображения остаются на оси, проходящей через центр голографической пластины.

До сих пор говорилось только о голограмме, получаемой от простого точечного объекта. Голография сложных объектов, таких, как статуэтки и шахматные фигуры, обычно используемых для демонстрации оптической голографии, может быть легко понята, если представить себе, что сложные поверхности этих объектов образуются из множества точечных. Каждая точка поверхности сложного объекта образует свою собственную голограмму, налагающуюся на голограммы от остальных точек. Полная голограмма кажется скоплением непонятных разорванных колец и зернистых капель. В действительности каждая компонента голограммы в процессе восстановления действует независимо от всех других, воспроизводя собственную точку на поверхности изображения объекта.

Поскольку голограмма может записываться на одной длине волны и восстанавливаться на другой, ясно, что она может быть записана с помощью моно-

хроматических звуковых волн и восстановлена лазерным светом. Основной эффект этого заключается в том, что получившееся видимое изображение искажается из-за разницы в длинах волн звука, используемого для записи голограммы, и света, используемого для ее восстановления. Простая фигура из трех точек растягивается в одном направлении (вдоль оси записывающего луча), когда длина волны восстанавливающего луча короче, чем записывающего. Растяжение, или продольное увеличение, равно отношению длин записывающей волны и восстанавливающей. Когда запись осуществляется в воде звуком с частотой один мегагерц и восстанавливается красным светом гелий-неонового лазера, изображение будет растянуто в 500 раз. Это приводит к кажущемуся (но не имеющему места на самом деле) исчезновению трехмерного эффекта, который так впечатляет, когда наблюдатель рассматривает восстановленную обычную оптическую голограмму. Иногда считают, что из-за линейного искажения изображения, полученное с помощью акустической голограммы, двумерно. Это неверно. Для улучшения качества изображения можно фокусировать его на различные плоскости с помощью устройств, преобразующих оптические параметры (таких, как пространственные фильтры). Предложен ряд методов для уменьшения искажения, но пока ни один из них не является вполне удовлетворительным.

Трехмерное восприятие в обычной оптической голограмме возникает при рассмотрении правильного изображения. В основном это происходит благодаря эффекту параллакса, возникающему при движении головы наблюдателя из стороны в сторону и рассмотрении им различных частей голограммы. Для каждого положения наблюдателя видимое изображение образуется площадью голограммы, определяемой диаметром зрачка наблюдателя. Следовательно, каждое положение наблюдения использует только малую часть всей площади голограммы. Этого достаточно для оптической голограммы, потому что разрешение (качество изображения), полученное с апертурой, равной диаметру зрачка, вполне приемлемо для голограммы, записанной на оптических длинах волн: разрешение непосредственно связано с отношением апертуры к длине записывающей волны.

Детекторы ультразвука

Так как длины волн, используемые для записи акустических голограмм, во много раз больше апертуры глаза, обеспечиваемое ими разрешение совершенно неприемлемо для невооруженного глаза. Таким образом (даже пренебрегая проблемой линейного искажения изображения), мы не можем использовать эффект параллакса при непосредственном наблюдении восстановленного изображения от акустической голограммы. Для того чтобы получить при восстановлении приемлемое качество изображения, апертура должна достигать размера всей голограммы. В результате наблюдение восстановленного из акустической голограммы изображения, по-видимому, будет осуществляться с использованием всей голограммы. При этом будет наблюдаться действительное изображение, сфокусированное на экран. Эффект трехмерности может быть реализован, если передвигать экран по всей глубине изображения.

Для записи акустических голограмм пригодны разнообразные методы, поскольку имеется много различных методов записи звука. В оптической голографии для записи голограмм обычно берется фотопластинка. Для записи акустической голограммы необходимо иметь акустический эквивалент фотопластинки. Наиболее естественной была бы запись звука прямо на фотопленку. Это возможно. Кусок экспонированной фотопленки можно поместить в слабый раствор фиксажа. Если на пленку, находящуюся в ванночке с фиксажем, воздействовать сильным звуком, в областях с высокой интенсивностью звука процесс закрепления ускоряется. Последующее проявление фотопленки, закрепленной в разной степени, дает изображение, соответствующее уровням звука на ее поверхности. Этот метод использовался для записи интерференционных картин акустических голограмм. Однако он имеет серьезные недостатки, так как записывающийся звук должен иметь очень большую интенсивность, но даже и тогда экспозиция обычно затягивается до получаса.

В другом методе крахмальная пластинка помещается в раствор йода. Под воздействием звука крахмал окрашивается йодом, записывая звуковую картину. В этом случае тоже необходимы высокий уро-

вень интенсивности звука и большое время экспозиции.

Если высокочастотный источник звука, например пьезоэлектрический преобразователь, поместить в бак с водой и направить излучение на поверхность, вода будет вспучиваться в местах, где звук достигнет поверхности. Акустические лучи двух таких высокочастотных источников, помещенных под водой и направленных на поверхность, будут интерферировать, и в результате появится интерференционная картина в виде установившейся ряби. Если какой-либо объект теперь поместить в один из лучей, то картина ряби на поверхности и будет голограммой объекта.

Такое изображение может быть восстановлено двумя способами. В первом — методе «реального времени» — просто освещают поверхность лазером. Рябь выполняет роль оптической фазовой голограммы. Правильное изображение предмета оказывается ниже поверхности воды, а сопряженное изображение представляется действительным изображением над поверхностью. Из-за линейного искажения, обусловленного разностью длин волн звука и света, восстановленное изображение оказывается значительно дальше от поверхности, чем сам предмет. Второй метод заключается в фотографировании ряби. При этом на фотопластинке получается голограмма, восстанавливаемая обычным способом.

При использовании первого метода восстановленное изображение (из-за линейного искажения, вызванного неравенством длин волн звука и света) находится настолько далеко от поверхности, что его можно разглядеть только в телескоп. Однако можно обойтись и без телескопа, поместив акустическую линзу между объектом и поверхностью таким способом, чтобы трехмерное изображение, образуемое линзой, проектировалось на эту поверхность. Опорная волна распространяется, как и прежде, но голограмма теперь сфокусирована, так что при восстановлении изображения оказывается на поверхности. В ранних экспериментах акустические линзы создавали значительные аберрации в голографическом изображении, но недавно выполненная работа с жидкостными акустическими линзами дала вполне удовлетворительные результаты.

При использовании водной поверхности возникают две основные проблемы. Первая — поверхность очень чувствительна к нежелательным колебаниям и крупномасштабным движениям, разрушающим рябь. Вторая — интенсивности рассеянного и опорного лучей должны быть разумно сбалансированы на поверхности. В противном случае на поверхности образуются течения, также разрушающие рябь голограммы. Это ограничивает используемую площадь водной поверхности, что в свою очередь ограничивает апертуру и, следовательно, качество конечного восстановленного изображения. Была разработана техника покрытия водной поверхности тонкой мембраной. Над мембраной создавалась нефтяная пленка толщиной несколько миллиметров, и рябь образовалась на поверхности этой пленки, а не на поверхности воды. Когда метод нефтяной пленки применяется вместе с новыми типами акустических линз и импульсными источниками звука, практическая ценность этой методики значительно увеличивается.

Недавно этот метод был использован для записи некоторых из наиболее хорошо восстановленных изображений, полученных до сих пор. Группа ученых сняла голографический кинофильм, дающий акустическое изображение золотой рыбки в масштабе реального времени [27]. Изображение получено при использовании звука с частотой 9 МГц. Ясно видны скелет рыбки и ее плотные внутренние органы. Хорошо видно движение внутренних органов, открытие и закрытие рта рыбки, поднятие и опускание ее спинных плавников. Такая система, работающая в масштабе реального времени, позволяет наблюдателю следить за движением объекта и опознавать его и имеет поэтому огромные достоинства. Интерпретация объекта может оказаться затруднительной, если наблюдатель рассматривает неподвижный объект. Эти и другие результаты показывают, без сомнения, что акустическая голография может играть важную роль в медицинской диагностике.

Существуют другие методы для записи голограмм, полученных на поверхности жидкости или непосредственно под ней. В них применяются механическое сканирование детектором, расположенным ниже уровня жидкости, и электронное сканирование пьезоэлектрическим преобразователем. Однако они не имеют значительных преимуществ перед указанным методом.

В другой серии экспериментов [27] была изучена волновая картина голограммы не в проходящих, а в отраженных волнах. В этих экспериментах использовались буквы А, R и L (начальные буквы английских слов Advanced Research Laboratory, Лаборатория перспективных исследований). Каждая буква была сделана в виде мозаики из камешков различного размера и была около 1,2 м высотой. Ученые хотели обнаружить, как будут отличаться голограммы при освещении букв звуком с тремя различными длинами волн. Для наглядности они собирались отпечатать изображение в различных цветах и получить при их наложении одно трехцветное изображение.

Для полной аналогии звук — цвет длины волн звука были выбраны так, чтобы между ними выполнялось то же соотношение, что и между длинами волн голубого, зеленого и красного света. Длины волн этих трех цветов примерно равны 420, 525 и 630 нанометров и относятся как 4 : 5 : 6. В соответствии с этим были выбраны длины звуковых волн 16, 20 и 24 мм, что соответствует частотам 21, 18 и 15 кГц.

Как, собственно, и ожидалось при планировании этого эксперимента, мишень, состоящая из твердых камешков, вела себя как «белый» отражатель звука. Поэтому голограммы для каждой длины волны очень похожи, а буквы в окончательном трехцветном изображении содержат примерно равные количества каждого цвета. При трехцветной печати первичные цвета — красный, зеленый и голубой — получались смешиванием их дополнительных цветов: цианин («голубой»), фуксин (красная анилиновая краска — «красный») и желтый. Окончательное изображение получалось наложением трех акустических голограмм в цветах, соответствующих длинам создавших их звуковых волн. Если это изображение воспроизвести на цветном диапозитиве и осветить когерентным лучом белого цвета (подобранной смесью когерентных красного, зеленого, и голубого света), то при таком восстановлении буквы будут казаться белыми.

В ранних экспериментах методы акустической голографии были прямыми акустическими аналогами оптических методов. Однако постепенно стало очевидно, что можно ввести совершенно новую технику, не имеющую оптического эквивалента. Например, при

электронном детектировании выходным сигналом детектора (микрофона) является электрический сигнал той же частоты и фазы, что и акустический. Поэтому вместо смешивания рассеянной и опорной акустических волн и последующего детектирования их суммы детектируют только одну акустическую волну, а выходной электрический сигнал детектора складывается с опорным электрическим сигналом. Опорный сигнал берется непосредственно от электронного генератора сигналов, питающего «освещающий» источник звука. Электронное суммирование в этом случае соответствует интерференции рассеянной и опорной волны. В настоящее время почти всегда используется электронная имитация опорной волны.

Другим важным преимуществом этого типа детектирования является возможность оперировать рассеянным сигналом, перед тем как сложить его с электронным опорным сигналом [27]. Это использовалось при исследовании относительной важности двух параметров рассеянной волны, обычно записываемых в голограмме: фазы и амплитуды. Это дало запись чисто фазовой голограммы. Брали электрический аналог рассеянной волны, амплитуда и фаза которой меняются при сканировании объекта детектором. С помощью электронных преобразований амплитуда поддерживалась постоянной (как бы сильно не менялась акустическая амплитуда), но фаза рассеянной волны сохранялась без изменений. Окончательная фазовая голограмма получается путем суммирования этого сигнала постоянной амплитуды с опорным сигналом тоже постоянной амплитуды. Фазовая голограмма отличается по виду от обычной голограммы только тем, что контрастность интерференционных колец постоянна по всей плоскости голограммы. (Изменения контрастности в обычной акустической голограмме соответствуют изменениям в амплитуде рассеянной волны). Фазовые голограммы, как правило, резче передают углы, чем обычные акустические голограммы. Более того, в некоторых случаях сохраняется относительная «акустическая яркость» деталей объекта.

Следующая хитрость, применяемая к звуковым, но не к световым волнам, привела к развитию новой техники, называемой «временной опорной голографией».

Как показывает название, записываются вариации рассеянной волны во времени, а не по отношению к опорной волне. Для этого регистрируется потенциал давления рассеянной акустической опорной волны в определенный момент периода акустического колебания. Главное преимущество, которым обладает временная опорная голография перед обычной акустической голографией, более высокая скорость записи, обеспечивающая более удовлетворительное изображение движущихся объектов.

Лаборатория перспективных исследований компании «Дуглас» разработала методику, пригодную для медицинской диагностики [27]. С ее помощью временные опорные акустические голограммы на звуковых волнах с частотой 1 МГц можно будет записывать за одну полумиллионную долю секунды. Этот метод использует новую форму оптической интерферометрической голографии — субволновую интерферометрию. Название показывает, что регистрируемые смещения — меньше одной оптической длины волны (в обычной интерферометрии смещения составляют многие оптические длины волн).

Вкратце метод состоит в следующем. Рассеянная акустическая волна падает на поверхность, заставляя ее колебаться с амплитудой, значительно меньшей оптической длины волны. Деформация поверхности регистрируется при освещении ее импульсным лазером, и на фотопластинке получается оптическая голограмма поверхности. Через полпериода (половину миллионной доли секунды) второй импульсный лазер, расположенный на той же оси, что и первый, на ту же фотопластинку записывает вторую голограмму деформированной поверхности. Однако за время, прошедшее между двумя экспозициями, световой путь оптической опорной волны уменьшается на четверть оптической длины волны. Когда восстанавливается двухкомпонентная оптическая голограмма, то вариации яркости восстановленного изображения поверхности пропорциональны вызванным акустической волной деформациям, происшедшим между двумя импульсами. Полученное таким образом восстановленное изображение поверхности и является временной опорной голограммой акустического волнового поля, отраженного от поверхности.

Описанный метод имеет несколько важных преимуществ. Во-первых, апертура такой голограммы ограничена только мощностью лазера, используемого для освещения поверхности. Импульсный лазер в состоянии хорошо освещать поверхность около $0,3 \text{ м}^2$, обеспечивая тем самым необходимые разрешение и качество изображения. Во-вторых, использование оптических средств для детектирования поверхности позволяет обойти серьезные инженерные проблемы, связанные с созданием электронных детекторов большой апертуры. В-третьих, чрезвычайно высокая скорость записи означает, что на эту систему слабо влияет движение объекта.

Техника записи с жидкой поверхности и оптической записи временных акустических голограмм, которая находится в настоящее время в стадии разработки, выглядит многообещающе как практически надежная система для работы с высокими ультразвуковыми частотами. Такие частоты, лежащие в мегагерцевой области, требуются в медицинской диагностике и при неразрушающих испытаниях материалов⁸. Получение высококачественных изображений человеческого тела, показывающих структуру мягких тканей, органов и сосудов, будет давать врачу новую клиническую информацию. Такая система будет значительным подспорьем существующим методам импульс-эхо и рентгеновским методом. По мнению зарубежных специалистов, акустическая голография для изображения объектов под поверхностью земли и моря находится в стадии разработки, но ее осуществление — дело будущего [27].

Диагноз по неслышимому звуку

Несмотря на целый ряд проблем, ультразвуковая (УЗ) голография конкурентоспособна по отношению к неголографическим методам визуализации, что определяется следующими присущими ей возможностями.

1. Формирование качественных УЗ изображений, в том числе и при большом поле зрения, обусловленное отсутствием каких-либо пространственных преобразований УЗ поля, рассеянного объектом.

⁸ Т. е. при исследовании прочностных и других физико-технических характеристик материалов без их деформации.

2. Формирование изображений различных сечений объекта на стадии восстановления в оптическом диапазоне.

3. Осуществление амплитудного синтеза изображений, т. е. применение операций сложения и вычитания УЗ полей, несущих информацию о различных объектах или о разных состояниях одного объекта.

4. Применение различных методов оптической обработки на стадии восстановления (согласованной фильтрации, преобразований Фурье, дифференцирования, интегрирования и др.) с целью определения интересующих деталей и структур исследуемых объектов.

Перечисленные возможности позволяют в конечном счете повысить достоверность диагноза при голографической визуализации внутренних структур медико-биологических объектов.

Для целей медицинской диагностики в основном используются УЗ колебания с частотами в диапазоне от 1 до 10 МГц, что определяется компромиссом между разрешающей способностью, увеличивающейся с увеличением частоты, и чувствительностью, уменьшающейся при увеличении частоты за счет возрастания поглощения УЗ волн в биологических тканях [20], [26].

Специфические особенности медико-биологических объектов определяют ряд требований к методам и аппаратуре УЗ голографии. К ним относятся:

1) динамичность органов и структур биологических объектов в процессе жизнедеятельности;

2) высокое поглощение УЗ энергии в биологических тканях;

3) небольшие вариации акустических параметров диагностируемых органов и тканей как в норме, так и при патологии;

4) соизмеримость диагностируемых структур и длин волн используемых УЗ полей.

Исходя из этих особенностей, основными характеристиками, определяющими возможность применения в диагностике того или иного голографического метода, следует считать время регистрации голограмм (быстродействие), пороговую чувствительность, динамический диапазон и разрешающую способность.

Глава 7 Голографический кардиограф



Электричество живого

Электрография в медицине — это наука об изучении связей между электрическими и физиологическими процессами, протекающими в живом организме. Электрография представляет собой область изучения электрической активности живой ткани, а электрокардиография — соответственно диагностический метод оценки состояния сердечной мышцы и сердечно-сосудистой системы при изменении во времени их электрической активности.

Применение электрокардиографии началось в конце 20-х годов текущего столетия, когда было предложено для регистрации электрической активности сердечной мышцы, органов, нервов и т. д. использовать магнитоэлектрический осциллограф, позволяющий интерполировать электрическую активность, записывать ее кривую на бумажной ленте. После этого электрическая диагностика бурно развивается. Изготовление предназначенных для нее приборов становится самостоятельной отраслью медицинского приборостроения. Развитие электроизмерительной техники, мето-

дов регистрации и всевозрастающий клинический опыт привели к тому, что электрокардиограф (прибор для снятия кривой электрической активности) стал достоянием любой поликлиники и является одним из основных приборов скорой и неотложной помощи.

Между первыми наблюдениями электрических свойств живой ткани и массовым использованием электрокардиографа прошло много десятков лет. Электроизмерительная техника развивалась достаточно быстрыми темпами, и имевшиеся возможности измерения электрической активности сердца могли бы быть реализованы раньше. Однако этого не произошло из-за того, что природа явлений, обуславливающих электрическую активность сердца, была неясна. Существовавшие гипотезы были противоречивы и не объясняли всей сути явлений. Для решений этой проблемы нужна уникальная комплексная физико-химическая и квантовомеханическая измерительная аппаратура.

В 1942 г. был обнаружен переход электронов из одной молекулы в другую, названный переносом зарядов. Это важнейшее открытие, которое целиком согласуется с современными представлениями о процессах в сложных полупроводниках, по-видимому, является основой для раскрытия природы возникновения биопотенциалов. Кроме того, оно по существу означает, что молекулы и атомы не являются независимыми и изолированными элементарными частицами — электронные облака двух молекул могут перекрываться, причем электрон одной молекулы может использовать орбиту другой.

Затем была разработана квантовомеханическая теория переноса заряда и систематизированы имевшиеся данные экспериментов. Эта теория, а также быстрые темпы развития науки о полупроводниковых свойствах веществ, включая и биополимеры, открывают огромные и интереснейшие перспективы в изучении природы биопотенциалов. Вероятно, имеет место сложное явление суперпозиции (совмещение) различных гипотез. Возможно, будет найдено совершенно новое объяснение многообразия явлений биоактивности. А пока практическая электрография базируется на огромном числе эмпирических данных и клинических наблюдениях, успешно помогая врачу.

Импульсы сердца

Электрокардиограмма — это кривая изменения электрической активности сердца, характеризующая деятельность сердечной мышцы в функции времени. На графике регистрируются изменения величины напряжения во времени. Для того чтобы получить электрокардиограмму (ЭКГ), на тело человека устанавливают два электрода и подключают их к измерительному регистрирующему прибору. Многочисленные исследования позволили найти участки тела, измерения с которых позволяют получить кривую, дающую наибольшую информацию. Существующие приборы-электрокардиографы могли бы давать более полную информацию, если расширить пределы регистрируемых частот.

Много неясного и противоречивого существует пока в исходных представлениях о природе появления электрической активности. Эти представления так или иначе высказываются, приводятся их доказательства. Но каким образом электрическая активность распространяется по телу, почему при расположении электродов на одних местах тела регистрируется одна кривая, а при расположении на других — другая, исчерпывающего ответа пока нет. Общие соображения об электрофизике явлений крайне противоречивы. Так же как и биофизика источника электрической энергии, определение путей распространения биотоков по телу человека нуждается в развернутых исследованиях. Надо отдать дань уважения электрофизиологам Ю. Ю. Чаговцу, А. Ф. Самойлову, С. С. Стериопуло, В. Ф. Чаговцу, Э. Эдриану и другим, а также многочисленной армии отечественных и зарубежных медико-клиницистов, которые сумели это сложнейшее явление использовать на благо человека [26]. Электрокардиографические данные дополняют клиническую картину течения заболевания, помогают врачу в правильной диагностике и правильной оценке хода лечения. Не случайно подчеркнуто, что электрокардиографические данные диагностики дополняют общую диагностику, хотя в подавляющем числе заболеваний они взаимно однозначны. Все-таки редко, но бывает так, что клиническая картина заболевания не регистрируется электрокардиограммой.

Сохранение формы, фазы и амплитуды кривой электрической активности означает нормальную, уверенную работу сердца. Отклонения от нормы — изменения интервалов времени общего цикла между всеми или отдельными его фазами, изменение амплитудных значений напряжений, изменение их знака, изменение соотношений между значениями амплитуд — показывают нарушение работы сердца. И одним из показателей серьезных нарушений сердечной деятельности является разрыв монотонности кривой или заметное изменение ее формы. Перечисленные изменения не являются исчерпывающими. Легко могут быть изображены наиболее характерные изменения кривой ЭКГ, отражающие различные виды сердечных заболеваний. Эти изменения в совокупности с другими показателями (величина артериального давления, показатели, характеризующие биохимию) помогают врачу установить диагноз и своевременно принять меры.

Итак, даже не зная досконально природы источника электрической активности, природы и законов распространения биотоков в организме, человек умело использует присущее ему, его жизни электричество в целях сохранения здоровья.

Электрокардиограф — это прибор, позволяющий измерить напряжение, характеризующее работу сердечной мышцы.

Электрокардиограф состоит из следующих основных частей: электродов, накладываемых на тело больного; широкополосного усилителя измерительного прибора с регистратором напряжений; эталонного источника напряжения, позволяющего уточнить масштаб измеряемого напряжения, и комплекта проводов, соединяющих электроды с электрокардиографом. Наиболее широко в СССР применяется одноканальный переносный электрокардиограф типа 060 и 061, который относится к категории приборов с непосредственной записью. Прибор предназначен для работы в клиниках, поликлиниках и на квартире больного.

В настоящее время разработаны новые электрокардиографы «Салют» и «Малыш» [26]. У них значительно меньший вес, более надежная регистрирующая система, а применение полупроводников делает их более надежными в эксплуатации.

Пока стрелка не на нуле...

Наука о спасении человека, почти потерявшего все признаки жизни, — реаниматология — многого достигла. Результаты ее все больше и больше применяются в практике скорой помощи, в больницах, в клиниках. Один из энтузиастов реанимации И. В. Шабан сделал следующее наблюдение: жизнь угасает, но кривая, характеризующая электрическую активность сердца, сохраняет свою форму. Пока сохраняется электрическая активность сердца, борьба за жизнь умирающего продолжается, и во многих случаях человека удается спасти.

Ну а что происходит, если наступает смерть? Появляются изменения электрической активности, которые очень быстро нарастают, а затем электрическая активность пропадает. Беспорядочные отдельные электрические импульсы наблюдаются иногда в течение часа. Жизнь покинула человека. Что же случилось? Число молекул и атомов, т. е. количество вещества, осталось практически тем же самым, изменилось только движение зарядоносителей — электронов и ионов. Может быть, в этом одна из загадок тайны смерти, и будущие исследователи, обладая иными, более совершенными средствами исследований, установят закономерность движения электронов, ионов и других зарядоносителей в живом организме, прямую связь ее с жизнедеятельностью. Возможно, одно из основных отличий живого от неживого и заключается как раз в различных молекулярных, атомных и межмолекулярных электронных связях? Отличие может быть в различной миграции электронов от молекулы к молекуле, в своеобразном движении ионов, в результате чего появляется особый вид электропроводности и особый вид поляризации, характеризующий накоплением зарядоносителей, фиксируемый электрокардиограммой. Может, пророческими окажутся слова Сент-Дьердьи, который писал: «Я глубоко убежден, что мы никогда не сможем понять сущность жизни, если ограничимся молекулярным уровнем. Ведь атом — это система электронов, стабилизируемая ядром, а молекулы — не что иное, как атомы, удерживаемые вместе поделенными электронами, т. е. электронными связями» [26].

Развивая эту мысль, можно предположить, что молекулы живого — это молекулы, взаимосвязанные энергетикой движения зарядоносителей, миграцией электронов, обладающие специфической проводимостью, присущей только живому. Даже обычные, хорошо изученные виды проводимости, такие, как ионная, электронная, электронно-дырочная, в живом обладают своей спецификой, не говоря уже о специфичности только для живого комплексного движения зарядоносителей всех видов. И это не простая сумма всех проводимостей: $1 + 1 + 1 = 3$. Придавая специфике движения электронов в живом основополагающее значение, нельзя отрицать огромной роли биохимических, биофизических и физических явлений и преобразований, в простейшей связи с которыми происходит движение электронов. Совокупность этих явлений, по существу, и обуславливает жизнь. Если предположить, что удастся раскрыть основные закономерности движения зарядоносителей электронов в живом организме и создать модель этого движения, то эта модель не будет живым организмом. Имеется еще немало явлений, которые пока скрывает природа. Однако это отнюдь не умаляет значения сказанного выше. Гипотеза о специфике движения зарядоносителей в природе живого как наиболее существенном отличии живого от неживого, высказанная Сент-Дьердьи и развитая его учениками, уже и сейчас не беспочвенна.

Тончайший механизм клеточной регуляции, энергетических преобразований, быстрота реакции организма в целом и отдельных анализаторов на изменения внешней среды, на внешние раздражители, быстрота обработки самой информации, оцениваемая по величине электрической активности, объяснимы наличием в основе этих процессов движения зарядоносителей. Сложнейшие биохимические обменные процессы в клетке, преобразование различного вида энергии в клетке или ее элементах, как, например, в митохондриях, объяснимы только тем, что перенос энергии производится частицами, обладающими массой, которая меньше атома, и в первую очередь прямо и косвенно электронами.

Известно, что электрическая активность мозга оценивается импульсами напряжения различной часто-

ты. Этот факт является результатом изучения сотен тысяч больных и здоровых людей, сотен тысяч подопытных животных.

Нарушения электропроводности в организме могут привести к серьезным нарушениям обменных процессов.

Вижу... токи крови

Советские ученые разработали лабораторный макет импульсно-когерентного ультразвукового кардиографа (ИК-УЗКАР). ИК-УЗКАР [20] позволяет получать как сведения о лоцируемых кардиоэлементах (эхокардиограмму), так и информацию о скорости лоцируемого кардиоэлемента, а также характере спектра скоростей кровотока в полостях желудочков сердца, аорте, левом предсердии и т. д.

Скорости структурных элементов и кровотока внутри сердца измерялись посредством измерения спектра доплеровских частот в отраженном импульсном УЗ сигнале.

Для решения этой задачи требуется довольно сложная система спектральной обработки. Спектральный анализ в координатах частота — время — спектральная плотность мощности (метод обобщенных голограмм) проводился с помощью разработанных в НИРФИ оптических одноканальных и многоканальных схем, работающих в некогерентном свете.

Импульсно-когерентный локатор ИК-УЗКАР-1 предназначен для определения величины и направления скорости движения выбранного кардиоэлемента.

Функциональная схема эхолокатора такова. Импульсы от кварцевого тактового генератора запускают генератор ударного возбуждения, который вырабатывает радиоимпульс. Импульс усиливается усилителем мощности и преобразуется в ультразвуковой импульс. УЗ импульсы посылаются в тело пациента и отражаются от структурных элементов сердца. Отраженные импульсы принимаются и преобразуются в радиоимпульсы, которые усиливаются широкополосным усилителем. С выхода усилителя сигнал подается на вход фазового детектора, куда также поступает сигнал гетеродина, настроенного на ту же частоту. На выходе

фазового детектора получаются видеоимпульсы, амплитуда которых зависит от фазового сдвига между сигналом гетеродина и принятым сигналом. Для получения информации о скорости движения одного выбранного кардиоэлемента сигнал с выхода фазового детектора стробируется ключом. Задержка стробимпульса и его ширина могут регулироваться во времени.

Выделение доплеровской частоты, заложенной в огибающей видеоимпульсов, производится фильтром нижних частот, с выхода которого сигнал записывается для дальнейшего анализа. Для наблюдения сигналов, отраженных от структурных элементов сердца, и выбора нужного элемента импульсы, полученные с выхода фазового детектора, подаются на усилитель вертикального отклонения осциллографа.

Разрешающая способность локатора по глубине — 1,5 мм, а диапазон измеряемых скоростей ± 18 см/с. Как указывалось выше, эхокардиограф ИК-УЗКАР-1 измеряет как абсолютную величину, так и определяет знак (направление) скорости [20], [26].

В задачах, связанных с измерением скорости кровотока в полостях сердца, необходимо расширить пределы измерения скорости. В связи с этим пришлось отказаться от определения знака, однако максимально измеряемая величина скорости увеличилась. Для обнаружения и регистрации движущихся потоков крови в полостях сердца был разработан эхокардиограф ИК-УЗКАР-3.

Эхокардиографические исследования с применением импульсных эхокардиографов позволяют в ряде случаев наблюдать на эхокардиограмме отражения от потоков крови. Однако сказать что-либо о скорости движения крови при использовании обычных импульсных эхокардиографов невозможно. При непрерывной доплеровской локации сердца также регистрируются сигналы, отраженные от потоков крови, что позволяет измерять скорости ее движения. В этом случае, однако, неизвестно, в какой полости сердца и на какой глубине находится регистрируемый поток. Импульсно-когерентная локация позволяет выделить доплеровский сигнал с определенной глубины интересующей нас полости сердца.

В режиме импульсно-когерентной локации, который осуществляется одновременно с эхолокацией, регистрировались доплеровские шумы кровотока. В ряде случаев регистрировались доплеровские шумы, которые не производили акустического феномена и фонендоскопом не прослушивались. По мнению врачей, использование импульсно-когерентного локатора для обнаружения доплеровских шумов кровотока поможет диагностике таких заболеваний сердца, как дефекты межжелудочковой и межпредсердной перегородок, стеноз аорты и т. п., что явится шагом вперед в УЗ диагностике заболеваний сердца.

Голографическая корреляция

Корреляционный анализ, использующий голографические методы, дает возможность получить более точные объективные данные по классификации ЭКГ [20]. Целесообразно анализировать ЭКГ в динамике для фиксации незначительных отклонений сердечной деятельности от нормы у больных, находящихся под наблюдением врача при амбулаторном лечении и при контроле состояния пациента во время операции. Результаты анализа сравниваются между собой. С учетом модификаций ЭКГ общее количество образов, с которыми должна сравниваться анализируемая ЭКГ, превышает 10^2 , в этой связи голографический коррелятор должен иметь многоканальное построение.

Нашими учеными были разработаны схемы многоканальных голографических корреляторов, обеспечивающих анализ ЭКГ в статике и динамике: коррелятора с вводом ЭКГ на фототранспаранте и оперативного коррелятора с вводом ЭКГ с помощью электронно-лучевого модулятора света, использующего в качестве динамического транспаранта электрооптический кристалл ДКДР.

Работа коррелятора, использующего ввод ЭКГ с помощью фототранспаранта, основана на мультипликации записанного на транспаранте изображения с помощью линзового растра, оптически связанного с объективами, на формировании фурье-преобразующим

объективом совокупности пространственных спектров, на пропускании указанных спектров через фотопластинку с записанной на ней матрицей фурье-голограмм эталонных изображений и получении в задней фокальной плоскости фурье-преобразующего объектива совокупности функций взаимной корреляции. С помощью линзового раstra, содержащего короткофокусные сферические элементы объектива и расположенного на фокусном расстоянии от линзового раstra объектива, формируется совокупность параллельных пучков, освещающих под различными углами изображение, записанное на транспаранте. Эта совокупность пучков после прохождения через транспарант преобразуется по Фурье объективом, в задней плоскости которого на фотопластинке формируется совокупность пространственных спектров анализируемой ЭКГ.

Объектив используется для формирования сходящихся опорных пучков, интерферирующих в плоскости фотопластинки с пространственными спектрами ЭКГ. После химической обработки фотопластинки на ее поверхности образуется матрица фурье-голограмм. Запись фурье-голограмм, с которыми сравнивается анализируемая ЭКГ, производится с помощью последовательного ввода транспаранта с изображениями различных ЭКГ; при этом передвижная диафрагма перемещается так, чтобы поочередно открывались элементы линзового раstra, обеспечивая прохождение одного пучка как в опорном, так и в предметном каналах.

В режиме корреляционного анализа в предметный канал помещается транспарант с анализируемым изображением, опорный пучок перекрывается и в отсутствие передвижной диафрагмы в плоскости входного окна фотоприемника формируется одновременно вся совокупность функций взаимной корреляции анализируемого изображения с изображениями, записанными на фотопластинке в виде фурье-голограмм. Формирование в опорном канале сходящихся световых пучков (на этапе записи матрицы фурье-голограмм) обеспечивает получение корреляционных функций в выходной плоскости без использования дополнительного объектива, расположенного за фотопластинкой.

Глава 8 Голография в системе человек-машина



Симбиоз человека и машины

Мы живем в век научно-технической революции. Основная особенность ее — все более широкая автоматизация физического и умственного труда. В наши дни усилился процесс внедрения техники в человеческое общество. Судьбы людей все теснее переплетаются с «судьбами» машин и механизмов. Уже сегодня на каждого жителя нашей планеты приходится в среднем более ста технических устройств. Управлять непрерывно усложняющимися машинами становится все труднее.

Считается, что пристальное изучение работы человека в системах управления началось в конце сороковых годов XX в. и связано исключительно с научно-технической революцией. Однако это не совсем так. Еще в двадцатые годы в нашей стране развернулось широкое движение за научную организацию труда (НОТ). Тогда же проводились исследования по разработке и практическому внедрению наиболее рациональных и прогрессивных методов управления машинами, усовершенствованию и реконструкции орудий труда. В. И. Ленин считал внедрение

НОТ одной из главных задач молодой Советской Республики.

Конечно, в наши дни научная организация труда проходит в новых условиях, резко отличных от того периода. Но и сегодня забвение основных принципов НОТ, в которых заключается идея оптимального согласования звеньев системы человек — машина, подчас приводит к нежелательным последствиям. При чем сам человек иногда оказывается слабейшим звеном всей системы управления.

В авиации резко возрос диапазон скоростей и высот полета. Стали известны факты необычных, труднообъяснимых ошибок, которые допускал летный состав. Штурманы снимали с приборов неправильные показания, летчики хватались не за те рычаги, ошибались при нажатии кнопок.

Аналогичные тревожные сигналы стали поступать с промышленных предприятий.

В последние два десятилетия наблюдался быстрый рост скоростных и мощностных характеристик «машинной армии». Это привело к тому, что машины начали предъявлять операторам «нечеловеческие» требования.

Летчик не успевал следить за показаниями приборов и индикаторов, манипулировать сотней переключателей. Из-за инерции зрения экипаж иногда не мог избежать столкновения с наземными препятствиями.

Начали раздаваться даже голоса: раз «человеческий элемент» стал тормозом прогресса, то он должен быть отстранен от управления техникой. «Человек и медленно думает,— говорили некоторые,— и плохо запоминает, он не умеет толком считать, часто ошибается и быстро устает. Поэтому надо заменить человека полностью автоматизированной машиной!» Родился технократический лозунг «Долой человека!».

Затем мотив «Долой человека» стал исчезать со страниц печати. Оказалось, что автоматы могут далеко не все, что и сам человек в общем-то не так уж плох. Выяснилось, например, что он хорошо учитывает вероятность событий и может предсказать их развитие, что объем памяти у него значительно больше, чем у вычислительных машин, и что держит он свою память в постоянной «боевой готовности», и

многое другое. Вывод о несостоятельности человека оказался явно преждевременным, и лозунг «Исключить человека из системы управления» заменил лозунг «Симбиоз человека и машины». Такое реалистическое решение пришло далеко не сразу, а в результате длительной и кропотливой совместной работы ученых и специалистов различных областей знания: медицины, биологии, математики, теории автоматического регулирования, психологии и физиологии. Возникла новая прикладная дисциплина: инженерная психология.

Инженерная психология (или, как ее еще называют, эргономика) является одной из тех дисциплин, которые рождаются на стыке наук: в ней тесно переплетаются методы и задачи областей, стоящих далеко друг от друга в любой классификационной схеме наук.

Инженерная психология выявляет общие принципы инженерного проектирования комплексных автоматизированных систем типа человек — машина, их оптимальные конструкции и технические характеристики с учетом возможностей оператора. Она исследует также психофизиологические потенциальные возможности человеческого организма, разрабатывает научные методы отбора и обучения операторов на специальных тренажерах. И здесь голографии предстоит сказать свое веское слово.

При управлении сложными процессами (например, различными летательными аппаратами и др.) практически нельзя предусмотреть всех неожиданных ситуаций, которые могут иметь место, и в соответствии с ними составить программу, поэтому в этих условиях все большее значение приобретает обратная связь через человека-оператора. Назначение систем отображения информации состоит в том, чтобы давать ответы на вопросы, которые интересуют оператора. Поэтому отображение информации на индикаторе должно осуществляться в форме, наиболее удобной для восприятия и осмысливания.

На основе полученной информации оператор задает программу машине через устройство ввода данных. Устройство ввода информации позволяет оператору взаимодействовать с вычислительной машиной. Когда оператору необходимо получить или преобразовать

какие-либо данные или когда он должен подать какую-нибудь команду, скорость и эффективность ввода и вывода информации из машины являются важнейшими характеристиками системы. Они в значительной степени определяют успешность решения поставленной задачи.

Таким образом, системы отображения информации предназначены обслуживать операторов, которые в свою очередь являются одним из элементов системы человек—машина. При разработке системы необходимо связать в единый комплекс оператора, вычислительную машину, отображающее устройство и устройство ввода данных, учитывая как физические характеристики машины, так и психологические и физиологические характеристики человека-оператора.

Трехмерный голографический индикатор

Окружающий нас реальный мир представляет собой трехмерное пространство, любая точка, поверхность или объем которого могут быть заданы функцией трех независимых переменных величин — координат. При отображении реального мира с помощью воспроизводящих устройств необходимо стремиться к тому, чтобы довести до наблюдателя полную информацию о всех трех измерениях объекта. Наиболее удобным для этой цели является объемное изображение.

Вместе с тем существует большое количество процессов (функции трех и более переменных), которые могут быть представлены в виде некоторой объемной модели (вектор в пространстве, одна или несколько точек в объеме, кривая линия и т. п.), где каждое измерение через определенный масштаб связано с одной из независимых переменных величин. Это позволяет получить наглядную картину процесса с целью наблюдения и изучения его. Например, при контроле движения некоторых объектов в пространстве или частиц в заданном объеме последние могут быть представлены на индикаторе в виде отдельных светящихся точек [8]. Для лучшего восприятия законов перемещения объектов целесообразно воспроизводить их следы, а мгновенные скорости изображать в виде

векторов. Подобное представление информации на объемном индикаторе позволяет оператору быстро проанализировать и оценить обстановку.

Однако по целому ряду объективных причин в процессе развития устройств отображения информации оказалось наиболее простым создание плоских изображений. Более того, разработка устройств для воспроизведения объемных изображений натолкнулась на целый ряд весьма сложных проблем. Поэтому до последнего времени в большинстве случаев отображение многомерных функций осуществлялось с помощью плоских устройств (осциллография, двумерная индикация и т. д.). Полная же информация о рельефе функции доводится до наблюдателя косвенными методами (с помощью нескольких проекций, аксонометрического изображения и т. п.).

В связи с тем все более остро ставится вопрос создания устройств объемного отображения, и значительно возрастает объем информации, который необходимо доводить до наблюдателя в единицу времени. Скорости наблюдаемых процессов могут быть очень велики, а время для оценки сложившейся ситуации и принятия определенных решений оператором достаточно мало. Совершенно очевидно, что использование в этих сложных условиях плоских индикаторов для отображения процессов, происходящих в объеме, малоэффективно, так как для мысленного представления пространственной картины процесса по двумерному изображению требуется затрата дополнительного времени.

Использующиеся в управлении воздушным движением до настоящего времени методы плоского отображения информации не позволяют быстро оценить обстановку при высокой плотности воздушного движения и больших скоростях летательных аппаратов, что весьма важно, например, в аэродромной зоне. Несмотря на имеющиеся большие достижения в деле создания средств знакового отображения, для диспетчера представляет значительные трудности в весьма короткое время воссоздать картину воздушного пространства на основе анализа отображаемой на знаковой электронно-лучевой трубке картины воздушной обстановки.

Наглядная объемная динамическая модель пространства существенно облегчит и ускорит действия диспетчера в сложных условиях.

Следует отметить, что подобная динамическая объемная модель могла бы быть чрезвычайно полезна в других системах управления обстановкой. Появление трехмерных индикаторов не означает отказ от использования имеющихся средств знакового отображения. Трехмерные индикаторы не смогут обеспечить доведение до диспетчера всего рабочего объема информации. Перспективность заключается в совместном разумном использовании этих двух устройств отображения, при котором будут реализованы сильные стороны каждого вида аппаратуры.

Изучение траекторий частиц при быстро протекающих процессах ядерных исследований потребовало создания систем регистрации и обработки событий в искровых или пузырьковых камерах. Применение объемного голографического индикатора для указанных целей совместно с оперативным запоминающим устройством позволит неограниченно растянуть во времени интересующие этапы процесса.

Представляет интерес использование трехмерных индикаторов в качестве выходных устройств в ЭВМ. В настоящее время для оперативного вывода информации из ЭВМ начинают применяться электронные печатающие устройства. При этом возможно получение как цифр, букв и специальных знаков, так и построение графиков. Быстродействие таких устройств очень высоко. Однако имеется весьма большое число задач, связанных с табулированием функций двух переменных. Для анализа результатов решения подобных задач требуется значительное время в связи с необходимостью построения объемной модели кривых так называемого рельефа функции. В настоящее время это осуществляется построением рельефа на плоскости в аксонометрии или другими способами. Подключение на выход ЭВМ голографического индикатора и соответствующее управление им со стороны ЭВМ позволит вести наблюдение и анализ результатов решения без потерь времени, связанных с последующим построением рельефа функции.

Можно указать еще на целый ряд областей науки и техники, где использование голографических объем-

ных индикаторов принесло бы ощутимый эффект. В медицинской электронике широко используется так называемый вектор-кардиограф для анализа деятельности человеческого сердца. Сейчас в этих приборах на экране ЭЛТ создается двумерное изображение. Вектор напряженности электрического поля сердца в зависимости от состояния сердечной деятельности имеет различную длину и различную ориентацию по отношению к осям человеческого тела. Наличие голографического индикатора, позволяющего наблюдать объемную картину распределения электрического поля сердца, сделает интерпретацию такого изображения значительно легче и действенней, чем при двумерной проекции на обычных вектор-кардиографах.

Интроскопия (как биологических, так и технических объектов) дает возможность с помощью ультразвука просматривать различные неоднородности внутри твердых тел. До настоящего времени наблюдение картины неоднородности производится по множеству сечений, вычерченных на бумаге.

Аналогичные приемы применяются при определении объема и формы рудного тела с помощью каротажных установок в геологии.

В связи с перспективностью разработки в Советском Союзе и за рубежом проводятся исследования голографических объемных индикаторов.

Основная характеристика трехмерного индикатора — качество восприятия наблюдаемого объема. Конечно, оценка здесь может быть только чисто субъективная, тем не менее изображения на трехмерных индикаторах по этому параметру можно и необходимо сравнивать друг с другом. В одном случае объем мысленно синтезируется по специфической информации изображения, воспроизводимой на плоском экране. В другом, используя свойство бинокулярного зрения (двумя глазами), имеется возможность воспроизведения псевдообъемного (иллюзорного) изображения. При этом наблюдение изображения производится только из одной определенной точки, для которой сохраняются пропорции различных измерений. Однако здесь исключается возможность обзора изображения с разных сторон. Объемные индикаторы дают изображение, которое является своеобразным макетом в трехмерном пространстве.

Глава 9 В лабораториях дизайнера антрополога, патологоанатома



Опознается образ

Способность живых существ распознавать под разнородностью внешних проявлений единую сущность получила название «опознавание образов». Удивительно зрительное опознавание, даже при некотором изменении внешнего вида, в частности, формы окружающих предметов. Трудно даже представить себе широту диапазона задач, связанных с изменениями формы, которые человек вынужден решать чаще всего бессознательно, буквально на каждом шагу. Мы мгновенно и без затруднений узнаем знакомое лицо, хотя его мимика и выражение (не говоря уже о ракурсе, «степени небритости» и пр.) могут отличаться от привычных. Мы узнаем знакомое место, хотя в принципе не можем дважды увидеть его точно из одной и той же точки, и следовательно, проекции составляющих его предметов (домов, деревьев и т. д.) на сетчатке глаза имеют всякий раз иную форму.

В самых разнообразных областях человеческой деятельности разработка форм предметов и их вари-

рование являются конечной или промежуточной целью работы. Специалисты авиационной медицины, разработывающие и совершенствующие систему приборной индикации, дизайнер, ищущий наиболее удобный и эстетичный вид предметов, биолог-антрополог, реконструирующий по черепу поверхность лица, художник, пишущий этюд за этюдом в поисках наилучших поз и мимики персонажей будущей картины, скульптор, работающий над портретом и пытающийся придать ему характерное выражение лица,— все эти специалисты так или иначе осуществляют сознательное и целенаправленное варьирование форм объектов их труда.

Если не ограничиваться изменчивостью форм, то можно подметить более общий факт: к изучению или использованию изменчивости так или иначе сводится едва ли не любая область человеческой деятельности.

Действительно, работа врача при постановке диагноза также связана с выяснением изменчивости [20], [13]. В данном случае речь идет об изменчивости симптомов заболевания, создаваемой индивидуальными особенностями больного. Если врачу удается правильно оценить изменения симптомов, вносимые этими особенностями, правильным оказывается и диагноз. Математическое моделирование этой деятельности лежит в сфере опознавания образов, однако ситуация в данном случае обладает важной спецификой: для целого ряда заболеваний индивидуальные особенности больных настолько преобладают над типичными проявлениями болезни, что не может быть и речи о накоплении какой-то выразительной статистики, и поэтому надежды на решение задачи часто связывают с совершенно неисследованной областью моделирования интуиции врача.

Изменчивость индивидуальных свойств внутри популяции животных и растений является тем источником, из которого селекционеры с помощью искусственного отбора (как и природа с помощью естественного) черпают возможности для совершенствования пород и сортов. В общественных отношениях также возникает проблема отбора. Так, в задаче подбора кандидата на данную должность изменчивость индивидуальных свойств претендентов позволяет поставить вопрос об оптимизации выбора по ряду критериев. Этот вопрос (разумеется, в сложных случаях) решается на основе

теории аддитивных полезностей; возможны и другие модели.

Приведенные примеры позволяют предположить, что преодоление, использование или изучение изменчивости пронизывают буквально все области деятельности человека. С этой точки зрения изменчивость представляется одним из самых общих явлений и как таковая заслуживает стать самостоятельным объектом изучения.

Опыт исследования изменчивости в ряде конкретных областей опознавания образов показывает, что, несмотря на отмеченную многоликость, абстрактное описание, отвлеченное от специфических атрибутов породившей ее прикладной задачи, укладывается в какой-либо из известных математических аппаратов или в некоторую комбинацию из таких аппаратов.

Это наводит на мысль о правомерности попытки создания общей теории изменчивости, которая содержала бы классификацию известных ее видов, методы описания, взаимосвязи различных видов изменчивости, а также предсказала бы возможные направления поиска и описания новых ее видов. Такая теория позволила бы найти решение многих задач, направленных на подавление изменчивости, как это требуется при опознавании образов, и многих задач, в которых, напротив, требуется генерирование последовательностей меняющихся объектов, как например, при промышленном или эстетическом конструировании. Разработка такой теории в настоящее время только начинается. (Подробно об этом рассказано в [13].)

Во многих биологических исследованиях в технике, в исследованиях метеорологических явлений возникает необходимость в построении тех или иных физических полей и прослеживании их динамики. Таковы, например, задачи, связанные с изучением распределений температуры или напряжения по поверхности тела и их динамики, распределений атмосферного давления и температуры по территории того или иного района земной поверхности и т. д. Общий способ рассмотрения таких скалярных полей состоит в отображении поверхности на координатную плоскость. Поскольку полностью изобразить такую функцию графически невозможно, прибегают к представлению ее семействами изолиний или привлекают художника для изготовле-

ния рисунков в перспективе подобно тому, как это часто делается для представления двумерных распределений плотностей вероятности.

Вместе с тем возможность наглядного восприятия вида таких полей очень важна. Человеческий глаз обнаруживает великолепную способность выявлять закономерности разных масштабов — от глобальных (игнорируя детальную структуру поля) до самых частных, относящихся к мелкой структуре функции на любой малой площадке в области ее определения.

Известным примером этого является немедленное (хотя у неподготовленных людей и бессознательное) схватывание формантной структуры речевого потока при ознакомлении с «видимой речью». Примером получения на такой основе важного научного результата может служить обнаружение тенденции к образованию спиралевидных скоплений или моделированию на ЭВМ межзвездных взаимодействий больших количеств звезд. Явление было обнаружено благодаря выводу получающихся расчетных картин на дисплей: наличие столь тонкого эффекта в распределении расстояний в россыпи точек-звезд практически невозможно было бы выявить расчетным путем, но с этой задачей без труда справился глаз человека. Многостадийная съемка позволила наблюдать процесс развития или угасания спиралевидной туманности в динамике. Таким образом, в основе этого результата лежат две важные предпосылки — визуализация расчетных картин и изменение временного масштаба развития явления в заданное число раз.

Голографический метод позволяет воссоздать обе эти предпосылки. С точки зрения голографической ЭВМ совершенно безразлично, представляет ли введенная в ее память функция поверхность кузова автомобиля или описание некоторого скалярного поля над плоскостью. С помощью разработанных алгоритмов машина может осуществить требуемые деформации этого поля и каждую стадию деформаций визуализировать на основе описанной выше модели освещения. Представленная таким способом функция имеет вид холмистой равнины, освещенной одним или несколькими «солнцами» и рассеянным светом. Этот рельеф можно рассматривать с разных сторон и под

разными углами, а также в объемном виде. Для наблюдения динамики изменений поля многостадийную съемку следует использовать как непрерывно демонстрируемый фильм, причем с помощью описанного ранее приема временной масштаб этих изменений можно сделать отличающимся от натурального в любое число раз, руководствуясь лишь удобством наблюдения.

Примером задачи обсуждаемого типа является медицинская задача описания динамики деформаций электрокардиограмм с их визуализацией. Сравнение такой динамики для здорового и больного сердца имеет существенное диагностическое значение. Это позволяет интерполировать промежуточные, реально не наблюдавшиеся стадии процесса и, что особенно важно, экстраполировать его будущее, еще не возникшие стадии. Этот эффект может быть использован для автоматического прогноза развития процесса, например, для прогноза перемещения зон давления или температур в метеорологических исследованиях, или развития поражений в сердечной мышце.

Какова была внешность Ивана Грозного?

Одной из основных задач медицинской криминалистики, антропологии, истории является задача воссоздания внешнего вида лица человека по его черепу [13].

Реконструкция лица по черепу представляет собой весьма сложную проблему, требующую сочетания в одном человеке знаний и навыков как медика, ученого-антрополога, так и художника, скульптора. Схематически реконструкция происходит в следующем порядке. На череп наносится сначала сетка из гребней меняющейся высоты, соответствующей средней толщине мягких тканей в данной точке лица. Сначала накладываются основные, определяющие гребни, затем следующие по значимости и т. д. По мере увеличения количества гребней эта сетка становится все гуще и в конце концов покрывает практически весь череп, образуя макет мягких тканей головы. Образовавшаяся поверхность является, однако, еще только заготовкой, своего рода «болванкой», для будущего

скульптурного портрета, хотя ее основные габаритные размеры автоматически оказываются согласованными с соответствующими размерами черепа, толщины тканей в разных местах головы и, в частности, лица, пока еще не индивидуальны, они соответствуют табличным, усредненным данным. Поэтому на описанном этапе процесса работа специалиста, несмотря на ее огромную трудоемкость (измеряемую месяцами), носит рутинный, в значительной степени механический характер и является подготовительной.

Иначе обстоит дело на втором этапе, когда приступают к индивидуализации лица, приданию ему надлежащего характера, выражения, возрастных или иных особенностей. При этом на первый план выходит творческое начало человека, его неформализуемая интуиция, сознательный и бессознательный учет косвенных, например литературных или свидетельских, данных о реконструируемом персонаже, его возрасте, характере, состоянии здоровья, выражении лица, привычках и т. д. Блестящие примеры подобного воплощения характера дают известные работы М. М. Герасимова по реконструкции внешности царя Ивана Грозного, князя Ярослава Мудрого и др. Весь описанный процесс сопровождается выполнением многочисленных рисунков, эскизов, пробных макетов и требует в ответственных случаях затраты чрезвычайно большого количества времени.

В связи с этим особенно эффективным представляется использование в процессе решения рассматриваемой задачи голографической ЭВМ с программами шаговой взвешенно-групповой аппроксимации преобразований и «освещения» получающихся поверхностей.

В соответствии с приведенным описанием процесса реконструкции использование ЭВМ происходит в два этапа.

Первый этап состоит в формировании заготовки, «болванки» поверхности головы, согласованной по размерам с предъявленным для реконструкции черепом. Этот этап выполняется машиной полностью автоматически. Для подготовки машины к его выполнению в ее память предварительно вводятся крадиометрические данные замеров черепа (координаты) для некоторого среднего, типичного для данной этнической группы человека, а также данные подробного обмера

(во всех точках) поверхности головы этого же человека. Эти данные образуют в памяти машины описание эталонной пары «череп — поверхность».

При предъявлении нового черепа производятся измерения его геометрии в тех же точках, что и на эталонном черепе. Эти замеры вводятся в память ЭВМ и являются исходными данными для ее работы на описываемом этапе.

Голографирование состоит из следующих операций. Сначала вводится в действие программа вычисления параметров требуемого преобразования. Программа сопоставляет координаты соответственных краниометрических точек эталонного и нового черепов и описанным выше образом вычисляет численные значения параметров для взвешенно-групповых формул, введенных в память ЭВМ заранее. После подстановки в формулы значений параметров вступает в действие программа собственно преобразования. Однако преобразованию подвергается не череп, а эталонная поверхность. В результате преобразования эта поверхность оказывается деформированной таким образом, что все ее основные размеры согласуются с размерами предъявленного черепа. Тем самым полученная поверхность образует требуемую «заготовку». С помощью программы «освещения» эта «заготовка» визуализируется, что позволяет скульптору оценить результат первого этапа.

Второй этап не преследует цели полной автоматизации процесса. Как было сказано, на этом этапе преобладает неформализуемое начало — интуиция, косвенные соображения о характере человека и т. д. Задача ЭВМ в данном случае состоит лишь в машинизации и ускорении процесса работы скульптора, в избавлении его от необходимости работы в материале, т. е. в достижении тех же удобств, что и при эстетическом конструировании. В связи с этим второй этап является полуавтоматическим. Взаимодействие специалиста с ЭВМ на этом этапе базируется на использовании описанного выше специализированного «переводчика» — транслятора, ориентированного в данном случае на комбинированную скульптурно-геометрическую терминологию.

Для удобства подачи команд на лицо автоматически наносится сеть псевдохарактерных точек (или дисплей снабжается световым карандашом). В связи

с этим в фразеологическом наборе могут содержаться команды двух видов — качественные и координированные. Возможность использования более удобных для специалиста качественных команд связана с существованием большого набора общепринятых наименований для разнообразных, часто достаточно мелких частей лица, например, центр щеки, внутренний угол левого глаза, правый выступ подбородка, правый угол рта и т. д. Для обеспечения возможности пользоваться такими командами в машине еще на уровне эталонной поверхности производится разметка необходимых точек или областей лица. При этом соответствующие символы, а с ними и сопоставляемые транслятором наименования следуют за своими точками и областями при любых деформациях поверхности, что освобождает специалиста от необходимости задания координат интересующих его участков лица. Скульптор может и не задавать количественных значений требуемых перемещений. В этом случае программа производит заданную деформацию малыми приращениями до команды «стоп».

Координированные команды предназначены в основном для наиболее тонких, отделочных операций с малыми участками лица, не имеющими специальных наименований. При необходимости координированные команды могут подаваться и взамен качественных. Координированная команда составляется из номера псевдохарактерной точки, оказавшейся на интересующем скульптора участке (или из номера нескольких таких точек, если нужна не точка, а область прикрепления), и из сведений о том, в каком направлении и насколько должна перемещаться эта точка (или каждая из точек в случае прикрепления). В команду вводятся также номера тех из ближайших псевдохарактерных точек, которые должны остаться неподвижными. По этим данным машина через посредство транслятора автоматически определяет необходимую группу преобразований, выбирает из набора подходящую весовую функцию и вычисляет значение параметров, после чего производит и визуализирует заданную деформацию. Если оказывается, что эта деформация неточно отвечает замыслу специалиста, он тем же способом вносит необходимые, еще более мелкие исправления в виде второй итерации и т. д.

Для большего удобства оценки результатов используется голографический стереоэффект. Если в конце работы окажется, что некоторые особо мелкие и тонкие изменения скульптору удобнее все же внести вручную, по специальной команде машина с помощью фрезерно-копировального автомата изготавливает бюст в материале, после чего специалист может завершить отделку.

Для придания реконструированному лицу естественного вида часто оказывается желательным (в особенности в криминалистике) выполнение ряда специфических, не имеющих отношения к формообразованию операций, сводящихся к нанесению на лицо грима. Под этим в описываемых разработках понимались такие операции, как придание необходимой окраски (точнее, степени зачерненности) бровям, глазам, губам, родимым пятнам и т. д., а также надевание на выработанную поверхность головы волосяного массива (парика) заданной формы, усов, бороды, очков и других возможных атрибутов.

Конструируется фоторобот

Рассмотрим еще одну задачу, относящуюся главным образом к области медицинской криминалистики,— задачу моделирования пластико-мимических изменений или задачу с фотороботом [13]. Разработки этого направления связаны с часто возникающей необходимостью воссоздать лицо человека по показаниям свидетелей, т. е. визуализировать словесный портрет. Решение этой задачи основывается на использовании альбомов, содержащих огромное количество зарисованных художниками разнообразных типов встречающихся форм всех частей лица — носов, ушей, бровей, ртов, овалов лица, волос, усов, губ, глаз и т. д. Каждый из этих рисунков повторен на диапозитиве и с помощью специального проектора может быть показан на экране с тем или иным увеличением, например до натурального размера. Проектор позволяет легко сменять диапозитивы и изменять их взаимное положение.

Подбирая по указаниям свидетелей диапозитивы и регулируя их расположение, оператор добивается

наибольшего сходства, после чего полученное изображение фотографируется.

Описанная система довольно громоздка. Кроме того, альбомы содержат дискретную совокупность вариантов носов, глаз и т. д., так что плавный непрерывный переход от варианта к варианту невозможен. Все элементы лица приведены в состоянии анфас, тогда как иногда требуется показать лицо и в другом ракурсе, например в профиль, три четверти. Наконец, результирующее изображение имеет вид штрихового рисунка, тогда как более естественной для свидетелей была бы фотография.

Применение для решения задачи ЭВМ с голографическим выходом позволяет преодолеть перечисленные трудности. Отличие этой задачи от предыдущей состоит в том, что нужно варьировать в довольно широких пределах мимику лица и имитировать болезненные изменения. Кроме того, в ее решении по понятным причинам нет автоматического этапа построения заготовки.

Схематически работа с машиной в этой задаче происходит так. В долговременную память машины вводятся типичные поверхности лиц для представителей различных национальностей и этнических групп. Если по данным свидетелей удастся установить, к какой из подобных групп может относиться нужное лицо, то в качестве эталонной используется поверхность, относящаяся к этой группе. В противном случае используется поверхность, предполагаемая по тем или иным соображениям наиболее вероятной.

Затем оператор, следуя указаниям свидетелей, начинает вносить с помощью электроники изменения в форму поверхности и элементы грима, в случае надобности меняя ракурс головы и характер освещения. Получающееся лицо показывается свидетелям объемным. Окончательный вариант фотографируется и передается для использования. Материалом для ввода исходной поверхности послужила контактная маска, измерения которой производились с помощью несложного приспособления. Это приспособление содержало «гребенку» из тонких вертикальных металлических щупов, отстоящих один от другого на небольшом расстоянии, причем глубина опускания каждого из щупов отсчитывалась по положению его верхнего конца

после того, как нижний конец касался маски. Вся линейка щупов могла перемещаться в перпендикулярном направлении по горизонтальным салазкам, между которыми лицом вверх была закреплена маска. Была предусмотрена и возможность перестановки всей системы вдоль линейки щупов, что позволяло после двукратного отсчета каждого сечения получить нужный шаг раstra в этом направлении.

Одна из антропологических задач связана с выяснением влияния заданных изменений тех или иных элементов лица на зрительное восприятие сходства. Разумеется, отыскать, реальных людей, лица которых были бы совершенно одинаковы, за исключением, положим, носа, меняющегося по определенной шкале, невозможно. Поэтому голографирование с помощью ЭВМ является вообще единственным способом решения задачи, если, конечно, не считать изготовления серий портретов вручную скульптором или художником. В ЭВМ эта задача легко решается для произвольных изменений любых элементов лица, поодиночке или в заданных комбинациях. Для этого подготавливаются формулы нужной последовательности деформаций и задается шаг приращений значений параметров, после чего машина автоматически генерирует серию изображений с требуемыми изменениями. Эту серию затем можно подвергать психологическому шкалированию в отношении сходства с помощью субъективно-статистической экспертизы и тем самым решить задачу.

Любое изменение, количественно сравнительно небольшое, меняет выражение лица, впечатление о характере субъекта. В алгоритме «освещения» обычно используются один-два источника некогерентного и один — когерентного света. Во многих случаях достаточно естественные пластические и мимические изменения удается осуществить с помощью плоских преобразований на двумерных изображениях.

В [13] показано несколько последовательных стадий мимической деформации — процесса появления улыбки. По заданию историков и кинематографистов эта работа выполнялась на материале известного автопортрета Леонардо да Винчи. При быстрой смене этих стадий с помощью кинопроектора зритель видит появление улыбки в реальном масштабе времени.

Количество источников движения в этой работе четыре (в районе углов губ и под глазами).

Большое значение в криминалистике и исторических исследованиях имеет задача моделирования возрастных изменений человеческого лица. Физиологически эти изменения обусловлены понижением с возрастом тонуса мягких тканей, что приводит к нависанию кожи, образованию складок и морщин. Одновременно в результате истирания зубов происходит подъем и выпячивание вперед подбородка.

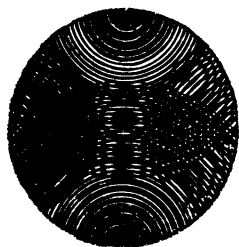
Эксперименты с возрастными изменениями, выполненные в рамках описываемых исследований, опирались на представленные антропологами-анатомами данные двоякого рода: о районировании лица с выделением более или менее независимо меняющихся с возрастом частей и о количественных смещениях этих частей и содержащихся в них линий для заданной разницы возрастов.

Пример искусственного состаривания с учетом таких данных лица приведен в [13].

Складки и глубокие морщины формировались при старении как обычные деформации поверхности (рельефные морщины). Для создания же мелких морщин использовались операции грима. В опытах грим наносился путем насильственного (не связанного с освещением) зачернения тех или иных групп элементов поверхности.

Возрастные изменения, как и мимические, можно моделировать и на материале плоских изображений. Показан процесс омоложения лица с еще одного, профильного портрета Леонардо да Винчи. Пластическая деформация сводилась здесь к опусканию и отведению назад подборка (два источника движения, группы поворотов и параллельных переносов; области прикрепления и влияния — круги и эллипсы). Грим состоял в постепенном ослаблении морщин, а также надевании парика. В кинематографическом оформлении эта серия стадий позволяет осуществить процесс омолаживания буквально на глазах.

Глава 10 Перспективы голографии живого



Теперь, когда мы являемся свидетелями настоящего «голографического взрыва» в различных областях человеческого знания, сомнения скептиков о возможностях голографии кажутся, по меньшей мере, наивными. Однако еще совсем недавно, в конце 60-х годов шансы голографии расценивались весьма невысоко.

Когда ленинградский аспирант Ю. Н. Денисюк (ныне лауреат Ленинской премии, член-корреспондент АН СССР) подал в 1962 г. авторскую заявку на открытие нового физического явления, то все три отзыва из весьма солидных научных учреждений, к сожалению, были отрицательные. В одном даже говорилось, что «все это давно уже было и всем давно известно», слово «открытие» многократно бралось в кавычки.

Комитет по делам изобретений и открытий не признал открытия Ю. Н. Денисюка (забегая вперед, отметим, что это ошибочное, как потом оказалось, решение было исправлено в 1970 г.).

Возможно, критика всего нового, необычного на первых порах бывает чересчур сурова, порой даже не совсем объективна. Но истина рано или поздно проложит себе

дорогу. Критика — своего рода свежий ветер, гасящий карнавальные искры гипотез-однодневок.

Однако если иметь в виду историю с голографией, парадокс заключается в том, что противники денисюковской идеи были в чем-то правы: голографию вполне могли открыть еще в XVII в. Именно могли. Могли, но не открыли! Голография буквально «висела на кончике пера». Интересно, что цветная голография тоже «висела на кончике пера». Ведь способ получения цветных фотографий с помощью толстослойных эмульсий был известен еще в XIX столетии. Однако только Ю. Н. Денисюк смог довести эти идеи до их материального воплощения. Причем воплощения на качественно иной основе.

Обычно фотопластинку, на которой регистрируется голограмма, рассматривают как среду, обладающую двумя измерениями. Это верно лишь до тех пор, пока толщина светочувствительного слоя сравнима с расстоянием между соседними интерференционными полосами. Если слой много толще, то проявляются особые свойства фотопластинок как трехмерной среды, впервые отмеченные Г. Липманом в 1891 г. и использованные им для цветной фотографии. Лауреат Ленинской премии, член-корреспондент АН СССР Ю. Н. Денисюк предложил использовать трехмерные среды для регистрации голограмм.

Если два интерферирующих пучка направлены навстречу друг другу (под углом $\alpha = 180^\circ$), то, как известно, в пространстве возникают стоячие волны — системы плоскостей узлов и плоскостей пучностей, расстояние между которыми равно $\frac{\lambda}{2}$. Если, в более общем случае, $\alpha \neq 180^\circ$, то нетрудно видеть, что расстояние между пучностями (или узлами) возрастает в $\frac{1}{\sin \alpha/2}$ раз и становится равным $\frac{\lambda}{2\sin \alpha/2}$. Плоскости узлов и пучностей световых волн будут, как видно из рис. 4, направлены по биссектрисе угла α .

Если ввести в зону пересечения световых пучков светочувствительную фотографическую эмульсию, то система узлов и пучностей будет в ней зафиксирована в виде полупрозрачных отражающих слоев металлического серебра.

Такая трехмерная дифракционная решетка будет обладать следующими свойствами: 1) свет, зеркально отраженный от слоев, будет восстанавливать волну от предметов. Действительно отражающие слои, как уже было сказано, направлены по биссектрисе угла, который составляют интерферирующие лучи, что и обеспечивает указанное свойство голограмм (рис. 4, в); 2) нулевой порядок, а также действительное изображение не будет создаваться; 3) пучки, отраженные от разных слоев, будут усиливать друг друга только в случае, если они синфазны (условие Липмана — Брэгга). Это приведет к избирательности голограммы по отношению к длине волны источника, в свете которого происходит восстановление волнового фронта. Условие синфазности выполнится лишь для той длины волны, в свете которой происходило образование голограммы.

Поэтому появляется возможность восстанавливать изображение с помощью источника сплошного спектра (лампы накаливания, солнца). Если голограмма экспонировалась в свете нескольких спектральных линий (например, синей, зеленой, красной), то каждая длина волны образует свою систему поверхностей. Соответствующей длины волны будут выделяться из сплошного спектра при восстановлении изображения, что и приведет к восстановлению не только структуры, но и спектрального состава световой волны, т. е. к получению цветного изображения. Все это справедливо, если обработка эмульсии не изменяет взаимного расположения отражающих плоскостей. Иногда вследствие усадки эмульсии длина волны восстановленного

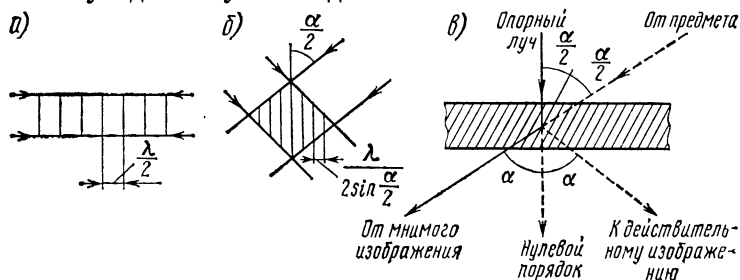


Рис. 4. Схема Ю. Н. Денисюка.

Стоячие волны образуются либо встречными пучками (а), либо пучками, сходящимися под углом, отличным от 180° (б); в — принцип восстановления световой волны с помощью трехмерной голограммы

изображения смещается в «синюю» (коротковолновую) сторону.

Взаимное расположение опорного источника, голограммы и предмета может быть любым. Однако для возникновения у голограммы трехмерных свойств необходимо, чтобы на толщине эмульсии укладывалось по крайней мере несколько отражающих слоев. При заданной толщине эмульсии это требование определяет зоны, в которых голограмму можно считать трехмерной.

При заданном положении голограммы наименьшей трехмерностью будет обладать голограмма, ориентированная перпендикулярно преимущественному направлению поверхностей узлов и пучностей. Такое расположение наиболее выгодно только в том случае, если необходимо получить действительное изображение при восстановлении волнового фронта с помощью несмещенного опорного источника. Если же нужно получить максимальную трехмерность, наиболее выгодно ориентировать голограмму вдоль отражающих слоев. При этом яркость действительного изображения нулевого порядка будет минимальной.

Толщина голографических фотоэмульсий — порядка нескольких микрон. Чтобы проявлялись трехмерные свойства голограммы, надо, чтобы отражающие слои располагались на расстояниях, в несколько раз меньших. Например, для эмульсии Кодак 649F эффекты третьего измерения проявляются, когда расстояние между отражающими слоями менее 4 мк [9], [10].

Открытие Ю. Н. Денисюка позволило создать высокоточные цветные объемные индикаторы. Их особенность состоит в том, что они не нуждаются в когерентной подсветке. Даже обычный солнечный свет в сочетании с толстослойной эмульсией в состоянии воспроизвести поразительные эффекты трехмерности. Но этого мало. Голограммы Денисюка чрезвычайно важны для врача-физиолога. Ведь не следует забывать также о чрезвычайной информативности цветовых характеристик медико-биологических объектов. Так, гемоглобин крови, содержащий железо, служит в организме главным образом как переносчик кислорода. В состав молекулы гемоглобина входят четыре иона железа в степени окисления + 2. Каждый из них способен соединяться с двумя атомами кислорода. Реакция

с кислородом обратима: он поглощается в легких, где его сравнительно много, и освобождается в тканях, где кислорода мало. При этом происходит изменение цвета крови. Гемоглобин, содержащий кислород, окрашивает артериальную кровь в ярко-красный цвет, а гемоглобин, лишенный кислорода, придает крови темно-красный цвет. Это происходит без изменения состояния иона железа: он находится всегда в одном и том же состоянии окисления $+2$. Но вот, если кровяные тельца на голографическом индикаторе приобретают коричневатый оттенок, это свидетельствует о начале серьезных изменений в организме, поскольку при этом железо приобретает степень окисления $+3$.

Голографический эндоскоп

Известны два пути реализации медицинских эндоскопических приборов с использованием голографического метода регистрации волновых полей [20]. Один из них предполагает регистрацию голограммы объекта внутри исследуемой полости. С этой целью в полость вводят капсулу с фотопленкой, на которой должна быть зарегистрирована голограмма, а излучение, необходимое для формирования объектной и опорной волн ее регистрации, вводят с помощью оптического волокна либо линзового волновода. Приборы, основанные на таком принципе, позволяют получить объемное изображение полости в пределах достаточно большого угла поля зрения. К недостаткам таких приборов следует отнести относительную громоздкость капсулы, низкое качество изображения, обусловленное искажениями опорной волны при ее передаче к месту регистрации голограммы, невозможность наблюдения изображения в реальном масштабе времени.

Другой возможный путь создания голографического эндоскопа предполагает передавать волновое поле излучения, рассеянного объектом по жесткой волоконной детали, а затем корректировать вносимые волокном фазовые искажения с помощью голограммы.

При этом оказывается возможным реализовать эндоскоп для наблюдения в реальном времени с большой разрешающей способностью при малом диаметре световода.

Учитывая высокую разрешающую способность и малый диаметр световода, можно создать на этом принципе эндоскоп-иглу. Советские ученые исследовали образования изображения при передаче волнового поля по волоконной детали с последующей коррекцией фазовых искажений волокон по методу, предложенному ранее для компенсации искажающего действия тонких неоднородных сред. На основании экспериментальных исследований были определены основные оптико-технические параметры эндоскопа с голографической коррекцией фазовых искажений.

Можно отметить ряд особенностей предлагаемого метода формирования изображения. Это высокая разрешающая способность; отсутствие объектива на дистальном конце эндоскопа; малый диаметр волоконной «иглы», который можно довести до 1—2 мм; отсутствие структуры волоконной детали в наблюдаемом изображении.

Правда, следует учитывать и ряд факторов, ограничивающих возможность рассматриваемого метода. К их числу относятся наличие фона в изображении, что затрудняет наблюдения малоконтрастных объектов, и необходимость осуществлять наблюдение в монохроматическом свете. Поэтому окончательные выводы о целесообразности подобных эндоскопов могут быть сделаны только после проведения специальных исследований на биологических объектах.

В криобиологии

Биология низких и сверхнизких температур — криобиология [20] привлекает все большее внимание специалистов в связи с тем, что низкие температуры обеспечивают пока практически единственную возможность длительного хранения клеток и тканей в жизнеспособном состоянии.

Современная криобиология признана решать такие проблемы, как раскрытие механизмов повреждения и защиты клеток в процессе замораживания — оттаивания, разработку и внедрение в практику эффективных методов глубокого охлаждения и хранения тканей и органов.

Разработка методов низкотемпературного хранения клеток и изолированных органов имеет огромное зна-

чение для дальнейшего развития медицины. В связи с этим возникает целый ряд принципиальных вопросов, решение которых необходимо для дальнейшего прогресса криобиологии. В частности, необходим анализ основных физических явлений, производящих в ней. Только более ясное представление о физических и химических факторах, лежащих в основе явлений, происходящих при замораживании клетки, даст возможность предсказывать, как повлияет данный эксперимент по замораживанию на жизнеспособность живой клетки.

Практика криобиологических исследований показала, что внедрение физических методов исследования при проведении экспериментов по замораживанию биоматериала позволяет раскрыть наиболее существенные, оказывающие сильное влияние на жизнеспособность клеток явления и составить на строго физическом уровне представления о механизме действия различных факторов, повреждающих клетки.

Изучение указанных явлений до сих пор производилось методами оптической криомикроскопии, криорентгенографии, дифференциального термического анализа и др. Однако они не позволяют получить достаточно полной информации, необходимой для понимания процессов, происходящих в биообъектах при действии повреждающих факторов холода. В связи с этим большие возможности открываются перед голографическими методами.

Была проведена серия успешных экспериментов по исследованию клеток крови и растворов, в которых они находились, методами голографической микроскопии при различных скоростях замораживания. В одном из них луч лазера делится светоделителем на два луча, один из которых формирует опорной волновой фронт, а второй, проходя через криокамеру с исследуемым образцом, формирует сигнальный волновой фронт. Подача хладагента (паров жидкого азота) производилась от сосуда, в который помещался электронагреватель. Давление паров, попадающих в криокамеру, пропорционально напряжению, приложенному к нагревателю. Таким образом, скорость охлаждения образца являлась функцией приложенного к нагревателю напряжения.

Ввиду ограниченности объема воздуха в простран-

стве, образованном поролюновой втулкой, объективом и покровным стеклом, конденсация паров незначительная и практически не вносит помех при наблюдении.

Проведенные эксперименты показали, что, когда ткань или суспензия клеток подвергаются замораживанию, в ней образуются кристаллы льда, причем, как правило, вначале в межклеточной жидкости. По мере дальнейшего охлаждения количество льда в межклеточной среде увеличивается вплоть до полного затвердевания препарата.

Голограмму анализирует ЭВМ

В последние годы в биологии и медицине стали уделять большое внимание апостериорной обработке изображений [20]. Это связано с тем, что, во-первых, существующая аппаратура во многих случаях достигла своего предела разрешения. Во-вторых, имеет место воздействие разного рода причин, ухудшающих качество изображения: смазывание изображения из-за движения объекта или регистрирующего аппарата, дефокусировка, влияние рассеивающей среды и т. д. В некоторых случаях требуется трехмерное представление исследуемого объекта, в то время как исходная информация принципиально может быть получена только в виде двумерных снимков.

В медицинской практике обычно имеют дело с изображениями, полученными в рентгеновском, ультразвуковом и оптическом диапазонах, а также в электронных микроскопах. Основные задачи апостериорной обработки в медицине сводятся к следующим: улучшение качества изображения, выявление отличий двух изображений, голографический синтез трехмерных изображений и распознавание объектов.

Качество рентгеновских снимков определяется размерами фокуса рентгеновской трубки, разрешающей способностью фотоматериала, структурой флюоресцирующего экрана и характером регистрируемого объекта. Как известно, основное влияние на качество рентгеновского изображения оказывают конечные размеры фокуса трубки. В то же время в медицинской практике часто требуется различимость весьма мел-

ких деталей, например, коронарных сосудов высших порядков при ангиографии сердца.

Следующая задача апостериорной обработки в медицине и биологии заключается в выявлении отличия двух изображений одного и того же объекта, снятых в разные отрезки времени. Это позволяет обнаруживать, например, новообразования, малозаметные для глаза, и таким образом, диагностировать болезнь на ее ранней стадии.

Очевидно, что двумерные изображения не могут дать полной информации об исследуемом объекте, поэтому естественно возникновение задачи трехмерной визуализации медико-биологических объектов. Решение этой задачи, в частности, существенно повышает диагностическую ценность рентгеновских снимков и значительно облегчит работу хирургов.

Существующие системы апостериорной обработки медико-биологических изображений не удовлетворяют в полной мере решению поставленных задач. Наилучшие результаты достигнуты в системе, работающей по методу выравнивания контраста при помощи фотографического репродуцирования с электронным управлением. Однако эта система не повышает разрешающей способности снимка и не позволяет выявить большее количество деталей, чем то, которое можно увидеть при тщательном изучении снимка на обычном просмотрном устройстве с регулируемой освещенностью.

Применение ЭВМ для обработки изображений значительно продвинуло решение задачи улучшения качества снимков. Здесь уже можно говорить о выявлении деталей, не наблюдаемых на исходном снимке. Однако применение ЭВМ требует больших материальных затрат и длительного времени обработки. Практически они могут быть использованы только для обработки ограниченных по размеру участков изображений.

Менее успешно решается задача трехмерной визуализации объектов. Попытки, предпринятые в этом направлении, привели к созданию лишь стереоскопических систем, в частности, диагностической системы для наблюдения рентгеновских изображений. Но, как известно, в стереоскопических системах присутствует только одна стереопара, и предмет наблюдается только

с одного ракурса без параллакса, следовательно, возможность всестороннего наблюдения объекта отсутствует.

Когерентно-оптические системы с применением методов голографии представляются наиболее перспективными. Основные достоинства этих систем, как уже отмечалось, заключаются в высокой скорости обработки весьма больших объемов информации, простоте выполнения интегральных преобразований типа свертки, корреляции, фурье-преобразования и других математических операций. Помимо этого, следует отметить относительную конструктивную простоту и компактность этих систем. Что касается трехмерной визуализации изображений объектов, то тут преимущества голографических систем очевидны.

Применение обычных голографических методов в оптическом диапазоне позволяет получить трехмерные изображения только внешних органов и легко доступных полостей. Ультразвуковая голография принципиально дает возможность визуализировать внутренние органы, но при переходе из ультразвукового диапазона в оптический из-за большой разницы в длинах волн теряется трехмерность. Поэтому, естественно, возникает необходимость в записи так называемых составных голограмм. Этот метод используется для решения разного рода задач, в том числе и для получения трехмерных голографических изображений по серии разноракурсных плоских снимков.

Существует несколько способов получения составных голограмм, однако все они сводятся к следующему. Записывается исходная информация в виде набора снимков объекта (в любом диапазоне длин), регистрируемых с различных точек наблюдения. Пленка с полученным набором разноракурсных изображений объекта помещается в систему голографической записи, и каждый кадр последовательно голографируется в виде отдельной полоски на одном и том же регистрирующем материале. После каждой экспозиции регистрирующая среда смещается на ширину щели, и затем экспонируется следующий кадр. Записанная таким образом составная голограмма восстаивается обычным путем, и наблюдатель видит объемное изображение объекта. При повороте голограммы или смещении точки наблюдения можно рассмотреть

изображение предмета практически со всех сторон, вплоть до 360° . Такой метод наиболее перспективен (и по-видимому, является единственным в настоящее время) для трехмерной визуализации внутренней структуры медико-биологических объектов. Это утверждение станет более обоснованным, если мы перечислим ряд достоинств, которыми обладает метод составных голограмм с точки зрения его использования в медицине и биологии:

возможность получения объемных изображений практически с любым углом обзора;

отсутствие необходимости разработки специальной аппаратуры для записи набора двумерных снимков, так как современная рентгенографическая, ультразвуковая, электронно-микрографическая и эндоскопическая техника в принципе позволяет иметь исходную информацию в требуемом виде;

возможность получения объемного изображения в динамике;

компактность и простота в эксплуатации.

Из известных способов записи составных голограмм конструктивно наиболее простым является наложение ряда голограмм одна на другую. При этом засвечивается вся поверхность фотопластинки. После каждой экспозиции пластинка поворачивается на угол, соответствующий разнице ракурсов между двумя соседними плоскими снимками, на которых зарегистрировано исходное изображение объекта. Минимальный угол поворота будет определяться ориентационной чувствительностью фотоматериала и допустимым угловым разрешением выходного зрачка глаза. При углах, меньших 15° , ухудшается разрешение восстановленного изображения, так как при реконструкции два изображения с соседних голограмм одновременно будут наблюдаться одним и тем же глазом. В данном случае следует учитывать также шумовые свойства фотоматериала. Каждая последующая голограмма, наложенная на предыдущую запись, вносит дополнительный шум и снижает контраст восстановленного изображения. Этот факт является недостатком данного метода и ограничивает количество голограмм, записываемых на единицу площади регистрирующего материала, а следовательно, снижает эффект объемности и угол обзора исследуемого объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахрах Л. Д., Гуревич С. Б., Гаврилов Г. А. Голография и ее практическое применение. Вестник АН СССР, 1972, № 10.
2. Вьено Ж.-Ш., Смигльский П., Руайе А. Оптическая голография. Развитие и применение. Пер. с фр. под ред. Ю. Н. Денисюка. М., «Мир», 1973.
3. Габор Д. Голография, 1948—1971.— «Электроника», 1972, № 6.
4. Гинзбург В. М., Степанов Б. М., Антонов Е. А. и др. Голография. Методы и аппаратура. М., «Советское радио», 1974.
5. Денисюк Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения. Доклады АН СССР, т. 44, 1275, 1962.
6. Кок У. Э. Лазеры и голография. Пер. с англ. под ред. Я. А. Смородинского. М., «Мир», 1971.
7. Кольер Р., Берехарт К., Лин Л. Оптическая голография. Пер. с англ. М., «Мир», 1973.
8. Леонов В. А. Трехмерная индикация. М., «Энергия», 1970.
9. Островский Ю. И. Голография и ее применение. М., «Наука», 1973.
10. Островский Ю. И. Голография. М., «Наука», 1970.
11. Сороко Л. М. Основы голографии и когерентной оптики. М., «Наука», 1971.
12. Строук Дж. Введение в когерентную оптику и голографию. Пер. с англ. М., «Мир», 1967.
13. Файн В. С. Алгебраическое моделирование формообразования. М., «Наука», 1975.
14. Дергачев В. В. Молекулярные и клеточные механизмы памяти. М., «Медицина», 1977.
15. Механизмы модуляции памяти. Сб. под ред. академика АМН СССР, члена-корреспондента АН СССР Н. П. Бехтеревой. М., «Наука», 1976.
16. Асратян Э. А., Симонов П. В. Надежность мозга, Изд-во АН СССР, 1963.
17. Структурно-функциональные основы механизмов памяти. Сб. под ред. доктора биол. наук Е. А. Громовой. М., «Наука», 1976.
18. Гоголицин Ю. Л., Кропотов Ю. Д. Методологические аспекты голографического моделирования памяти (в сб. «Методологические вопросы теоретической медицины» под ред. академика АМН СССР, члена-корреспондента АН СССР Н. П. Бехтеревой). М., «Медицина», 1975.
19. Кибернетические проблемы бионики. Сб. пер. с англ. под ред. Г. Е. Поздняка и Г. И. Рыльского. М., «Мир», 1972.
20. Применение голографии в биологии и медицине. Сб. под ред. члена-корреспондента АН СССР Л. Д. Бахраха и канд. техн. наук В. А. Макеева. М., «Наука», 1977.
21. Рукман Г. И., Клименко И. С. Электронная микроскопия. М., «Знание», 1968.
22. Иваницкий Г. Р., Куниский А. С. Математические методы исследования структур. М., «Знание», 1975.

23. Себрант Ю. В., Трояновский М. П. Лазеры и живая ткань. М., «Знание», 1972.
24. Покровский Г. И. Свет, глаз, информация. М., «Знание», 1968.
25. Грегори Д. Глаз и мозг. М., «Мир», 1970.
26. Манойлов В. Е. Электричество и человек. М., «Энергия», 1975.
27. Лазеры. Сб. пер. с англ. под ред. В. П. Павлова. М., «Наука», 1977.
28. Жерарден Л. Бионика. Пер. с фр. М., «Мир», 1971.
29. Василенко Г. И. Голографическое опознавание образов. М., «Советское радио», 1977.
30. Оптическая голография. Практические применения. Сб. под ред. В. М. Гинзбург и Б. М. Степанова. М., «Советское радио», 1978.
31. Применения лазеров. Сб. пер. с англ. под ред. В. П. Тычинского. М., «Мир», 1974.
- Бахран А. Д., Курочкин А. П. Голография в микроволновой технике. М., «Советское радио», 1979.

Владимир Сергеевич ФРОЛОВ

ВОЛШЕВНОЕ ЗЕРКАЛО

Редактор
Н. И. Феоктистова
 Заведующий
 естественнонаучной
 редакцией
А. А. Нелюбов
 Мл. редактор
Н. Т. Карякина
 Худож. редактор
М. А. Бабичева
 Художник
В. И. Пантелеев
 Техн. редактор
Т. В. Пичугина
 Корректор
В. Е. Калинина

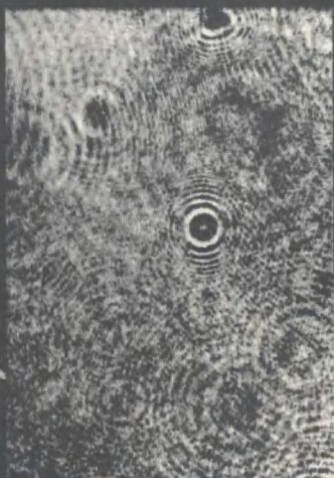
Сдано в набор 17.01.79. Подписано к печати 29.05.79. Индекс заказа 96719. Формат 84×108/32. Бумага типогр. № 1. Гарнитура школьная. А07174. Печать высокая. Бум. л. 2,25. Печ. л. 4,5. Усл. печ. л. 7,56. Уч.-изд. л. 7,29. Тираж 90 000 экз. Изд. № 630. Заказ 9—287. Цена 35 коп.

Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4.

Головное предприятие республиканского производственного объединения «Полиграфкнига» Госкомиздата УССР, 252057, Киев-57, ул. Довженко, 3.

Волшебное зеркало

■ Голография начиналась так ...



- Глаз как оптический прибор
- Голография и память
- От скальпеля к световому перу
- На голограмме аэрозоли и вирусы
- Видимый звук
- Голографический кардиограф
- Голография в системе человек-машина
- В лабораториях дизайнера, антрополога, патологоанатома
- Перспективы голографии живого

